

## Analyse golfklapproeven en golfoverslagproeven

Gras op zand onderzoek product 8



**Analyse golfklapproeven en golfoverslagproeven**  
Gras op zand onderzoek product 8

## Analyse golfklapproeven en golfoverslagproeven

Gras op zand onderzoek product 8

<b>Opdrachtgever</b>	Waterschap Drents Overijsselse Delta
<b>Contactpersoon</b>	P. Schoonen
<b>Referenties</b>	Opdracht onderzoek gras op zand, kenmerk Z/19/025946/137132 d.d. 5 mei 2020
<b>Trefwoorden</b>	Grasbekleding, golfoverslagproeven, golfklapproeven, gras op zand, Vechtdijk, erosie

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	13-09-2021
<b>Projectnummer</b>	11204369-002
<b>Document ID</b>	11204369-002-GEO-0015
<b>Pagina's</b>	120
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)


Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	A. van Hoven	T.P. Stoutjesdijk P. van Steeg	G. de Vries	
1.0	A. van Hoven W.J. Klerk	P. van Steeg (H2 & 5.: M. Boers A. Smale	G. de Vries	



# Samenvatting

In Nederland komen op dijken vooral grasbekledingen op een substraat van klei voor. Er zijn echter ook taluds met een grasbekleding op een substraat van zand. Voor de beoordeling van gras op zandbekledingen zijn momenteel geen modelparameters beschikbaar. Deze parameters zijn nodig om een beeld te krijgen van de veiligheid van dijken met een gras op zandbekleding en, specifiek voor de Overijsselse Vechtdijk, om een beeld te krijgen van de versterkingsopgave.

De modelparameters hebben betrekking op erosie door golfklappen op het buitentalud en op erosie door golfoverslag op de kruin en het binnentalud. Medio 2020 is het project gras op zand gestart met als doel om eind 2021 te komen tot rekenwaarden voor deze modelparameters. Hiertoe is in opdracht van Waterschap Drents Overijsselse Delta onderzoek uitgevoerd dat heeft bestaan uit een voorbereidende fase (afgerond), het uitvoeren van grootschalige golfklap- en golfoverslagproeven (afgerond) en nu wordt voortgezet met de analyse van de proefresultaten en het afleiden van rekenwaarden.

Deze rapportage betreft de stap om van de proefresultaten te komen tot schattingen van de kansverdelingen van de erosieparameters voor golfoverslag en voor golfklappen. Uitgangspunt bij de analyse was het bestaande kader van de beoordeling en de bestaande erosiemodellen voor gras op klei zoals beschikbaar in het WBI 2017. Dit zijn kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet voor erosie door golfoverslag en het standtijdmodel voor golfklappen. Hierbij wordt opgemerkt dat de kansverdelingen voor het kritisch golfoverslagdebiet worden afgeleid van berekeningen met de cumulatieve overbelastingmethode.

Met deze modellen zijn de uitgevoerde grootschalige proeven teruggerekend naar erosieparameters voor gras op zand. Voor golfklappen betreffen dit de parameters  $a$ ,  $b$  en  $c$ . Voor golfoverslag betreft dit de kritische frontsnelheid  $U_c$ . Ook proeven op gras op zandbekledingen uit andere projecten uit het verleden zijn betrokken bij de analyse, evenals de onderzoeken naar de bodem en vegetatie langs de Vechtdijk uit het vooronderzoek.

Voor het standtijdmodel voor golfklappen leidt de analyse tot een resultaat dat aanzienlijk ongunstiger ligt dan voor gras op klei. Bij een standtijd van 12 uur, de rekenwaarde van de belasting voor een groot deel van de Overijsselse Vechtdijk, wordt een maximaal toelaatbare rekenwaarde van de golfhoogte verwacht van circa 0,4 m (dit is de 5% ondergrenswaarde).

De erosiebestendigheid van gras op zand bekledingen bij golfoverslag is grootschalig beproefd. De opgelegde belasting was veel hoger dan onder extreme condities kan voorkomen langs de Vechtdijk maar leidde in meer dan de helft van de proeven niet tot falen. De verwachtingswaarde van de kritische frontsnelheid, waarmee de erosiebestendigheid van een grasbekleding wordt gekarakteriseerd, is iets lager dan die van een open zode op klei en aanzienlijk hoger dan waarmee op voorhand rekening werd gehouden.

Deze resultaten worden in een volgende fase, in het kader van Product 9 – kalibratie, gebruikt voor het afleiden van rekenwaarden, waarmee de beoordeling van gras op zand bekledingen daadwerkelijk kan worden uitgevoerd.



# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Achtergrond	7
1.2	Uitvoerenden van het onderzoek	8
1.3	Doel	8
<b>2</b>	<b>Erosie golfklapzone</b>	<b>9</b>
2.1	Inleiding	9
2.2	Modellering	9
2.3	Proefbeschrijving	10
2.4	Samenvatting van de proefresultaten	14
2.5	Standtijdlijnen gras op zand	15
<b>3</b>	<b>Erosie door golfoverslag</b>	<b>19</b>
3.1	Inleiding	19
3.2	Model en terugrekenprocedure $U_c$	19
3.2.1	Model	19
3.2.2	Terugrekenprocedure $U_c$	20
3.3	Frontsnelheden golfoverslagproeven	21
3.3.1	Inleiding	21
3.3.2	Belasting op de kruin	23
3.3.3	Ontwikkeling frontsnelheid op het binnentalud	23
3.3.4	Variabiliteit in de gemeten frontsnelheden	24
3.3.5	Resultaten frontsnelheden	24
3.4	$U_c$ uit proeven Vechtdijk 2020-2021	26
3.4.1	Strook 1-1a Buitentalud Berkum	29
3.4.2	Strook 1-2 Buitentalud Berkum	31
3.4.3	Strook 1-1b Buitentalud Berkum (WOS)	32
3.4.4	Strook 2-1 Buitentalud	33
3.4.5	Strook 2-2 Binnentalud	34
3.4.6	Strook 3-1 Hessenweg Binnentalud	35
3.4.7	Strook 3-1 Hessenweg binnentalud – aanvullend graverij	35
3.4.8	Strook 3-2 Hessenweg buitentalud	36
3.4.9	Strook 3-3 Hessenweg binnentalud aanvullend kort gras en graverij	37
3.4.10	Samenvatting teruggerekende $U_c$ 's	38
3.5	$U_c$ uit proeven Vechtdijk 2010	39
3.6	$U_c$ uit proeven Zwolle Olst	42
3.7	$U_c$ uit grastrekproeven	45
3.8	Relatie $U_c$ met bodem- en vegetatieparameters	47
3.8.1	Bodem	48
3.8.2	Vegetatie	52

3.9	Interpretatie resultaten $U_c$	57
<b>4</b>	<b>Risicogestuurd beheer en onderhoud</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>Conclusies</b>	<b>63</b>
5.1	Faalgedrag gras op zand bekleding	63
5.2	Standtijden voor golfklappen	64
5.3	Golfoverslag	64
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>67</b>
<b>A</b>	<b>Videoanalyse frontsnelheden</b>	<b>69</b>
<b>B</b>	<b>Invloed variabiliteit frontsnelheid per volume op <math>U_c</math></b>	<b>74</b>
<b>C</b>	<b>Frontsnelheden per proefstrook</b>	<b>76</b>
C.1	Locatie 1-1a RUS	76
C.2	Locatie 1-1b WOS	77
C.3	Locatie 1-2 RUS	79
C.4	Locatie 2 RUS buitentalud 1	80
C.5	Locatie 2 RUS binnentalud 2	83
C.6	Locatie 3 RUS binnentalud strook 1	86
C.7	Locatie 3 RUS buitentalud strook 2	89
C.8	Locatie 3 RUS binnentalud strook 3	91
<b>D</b>	<b>Risicogestuurd beheer en onderhoud</b>	<b>94</b>
<b>E</b>	<b>Variatiestudie b-waarde in standtijdlijn</b>	<b>114</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Uit de veiligheidsbeoordeling van Dijktraject 9-1 ten noorden van de Overijsselse Vecht en Dijktraject 53-3 ten zuiden van de Overijsselse Vecht is gebleken dat de dijken niet voldoen aan de norm voor de overstromingskans. Daarom zijn deze dijken opgenomen in het Hoogwater Beschermingsprogramma (HWBP) om te worden versterkt. Een belangrijke reden voor de twijfel aan de veiligheid is de grasbekleding die direct op zand wortelt. Hiervoor zijn in het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017 geen modellen beschikbaar. De kennis ontbreekt momenteel om de faalkans van een grasbekleding op zand te bepalen. Dit geeft een grote onzekerheid in de scope van de dijkversterking.



Figuur 1.1 Overzichtkaart Vecht en dijktrajecten 9-1 en 53-3

Voorafgaand aan de scope bepaling van de dijkversterking wordt in de periode tot en met december 2021 onderzoek gedaan naar de erosiebestendigheid van de gras op zand. De resultaten van het onderzoek moeten leiden tot een betrouwbare onderbouwing van de versterkingsopgave van de Vechtdijken. Het projectgebied ligt tussen de kruising met de A28 in het westen tot het einde van de dijktrajecten bij Ommen in het oosten (Figuur 1.1).

Het onderzoek bestaat grofweg uit drie fasen: 1) een voorstudie, waarin de stand van zaken met betrekking tot de kennis van gras op zand wordt beschreven en de dijk wordt gekarakteriseerd door vegetatie, bodem en wortelonderzoek. De voorstudie is in het winterseizoen 2020-2021 gevolgd door 2) grootschalige erosieproeven met de golfklap-generator en de golfoverslagsimulator. Ten slotte 3) worden de resultaten van de proeven en de karakterisering van de dijk gebruikt om rekenwaarden van de erosieparameters af te leiden die kunnen worden gebruikt om de scope van de dijkversterking goed onderbouwd te bepalen.

Dit rapport betreft de analyse van de grootschalige erosieproeven (Product 8 Analyse; P8), dat onderdeel is van de derde en laatste fase van het project gras op zand. Bij de analyse is gebruik gemaakt van de resultaten van het vooronderzoek en vooral de feitelijke rapportage van de grootschalige erosieproeven [1]. De stap die bij de analyse wordt gezet is die van proefresultaten naar schattingen van de kansverdelingen van de erosieparameters. Uitgangspunt hierbij is de bestaande modellering voor gras op klei, zoals toegepast in het WBI 2017. De kansverdelingen van de erosieparameters zullen vervolgens worden verwerkt tot rekenwaarden (Product 9 kalibratie; P9). Deze rekenwaarden kunnen worden gebruikt voor de scopebepalende berekeningen voor de Vechtdijk en voor de beoordeling van gras op zanddijken elders in het land.



Opgemerkt wordt dat gekeken wordt naar de beoordeling van bestaande gras op zand dijken en niet naar het ontwerp hiervan. Aan het ontwerp van dijken met een gras op zandbekleding zitten onzekerheden die in het kader van dit project niet worden behandeld. Door gebrekkige kennis over de ontwikkeling van grasbekledingen op een substraat van zand en de verwachting dat ontwikkeling hiervan mogelijk tientallen jaren zal duren wordt ontwerpen hiervan afgeraden.

## 1.2 Uitvoerenden van het onderzoek

Het onderzoek naar gras op zand wordt uitgevoerd door de projectgroep met vertegenwoordiging vanuit de volgende partijen:

- Deltares (hoofdaannemer).
- Waterschap Drents Overijsselse Delta (Opdrachtgever).
- Infram Hydren.
- Radboud Universiteit Nijmegen.
- Van der Meer Consulting B.V.
- Wageningen Environmental Research (WnR)..
- EurECO ecologisch onderzoek & advies.
- Universiteit Twente.
- Lumbricus B.V.

Elk van de partijen vervult hierin een rol, zoals beschreven in [14]. Onderhavig rapport is opgesteld door Deltares.

## 1.3 Doel

Het doel van het onderzoek is om erosiebestendigheidsparementers te bepalen voor grasbekledingen op zand, waarmee de scope van de dijkversterking van de Vechtdijk kan worden onderbouwd. De hoofdvragen waarop met dit onderzoek beoogd wordt antwoord te geven zijn:

- Is het standtijdlijnmodel voor golfklappen voor graserosie buitentalud (GEBU) toepasbaar voor situaties met gras op zand, en zo ja, wat zijn dan de rekenwaarden voor de a, b en c in de standtijdlijn in de methode voor golfklappen op gras op zanddijken?
- Wat is, voor golfoverslag, de kansverdeling van  $U_c$  voor grasbekledingen op kruin en binnentalud (GEKB) op zanddijken?

Deze hoofdvragen zijn (in iets gewijzigde vorm) overgenomen uit het Plan van Aanpak behorende bij dit onderzoek [14].

Het doel van dit analyserapport (P8) is het verwerken van de resultaten van grootschalige erosieproeven die in het kader van dit project zijn uitgevoerd [1] en eerder uitgevoerde onderzoeken naar gras op zand zoals samengevat in [5], tot schattingen van kansverdelingen van erosieparameters. Hierbij wordt een keuze gemaakt over de mate van het meenemen van graverij op de erosiebestendigheid en wordt gekeken naar de representativiteit van de grootschalige proeflocaties voor het hele areaal. Deze kansverdelingen zijn noodzakelijk om rekenwaarden af te leiden (P9). Uiteindelijk moet het volledige onderzoek worden samengevat en verwoord in een eindadvies Product 10 Eindadvies (P10), dat zal worden opgeleverd aan het Waterschap om daarmee de scopebepalende berekeningen uit te voeren voor de Vechtdijken. Daarnaast wordt regelmatig afgestemd met het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI), zodat de resultaten van het onderzoek kunnen worden opgenomen in het BOI 2023 voor toepassing op het hele areaal van gras op zanddijken.

## 2 Erosie golfklapzone

### 2.1 Inleiding

Als gevolg van golfklappen kan erosie van de grasbekleding op het buitentalud optreden. De beoordeling en het ontwerp van grastaluds op golfklappen op klei vindt plaats met de zogenaamde standtijdlijnen. Deze lijnen geven de relatie weer tussen de standtijd van de grasbekleding (uur) en de golfhoogte  $H_{m0}$  (m). Met de grasbekleding wordt in het geval van gras op zand de toplaag bedoeld. Dit is de doorwortelde en samenhangende laag met een dikte van circa 0,3 à 0,4 m op het losse zand in de kern van de dijk (zie paragraaf 3.4 voor de beschrijving). Na een doorbraak van de toplaag is er niet per definitie een overstroming. Daarvoor zullen eerst de vervolgmecanismen (zoals erosie van de onderlagen) moeten leiden tot een afdoende grote bres. In [8] is aandacht besteed aan het ontstaan van een afslagprofiel in zand, zonder rekening te houden met de grasbekleding, dus bijvoorbeeld wanneer de grasbekleding beschadigd is. Voor sommige dijkvakken langs de Vecht biedt alleen het zand mogelijk al voldoende weerstand om een overstroming door golfaanval te voorkomen. De scope van dit onderzoek beperkt zich echter tot het modelleren van het doorbreken van de toplaag. De onderlagen worden daarbij dus niet in rekening gebracht.

Voor gras op klei (een gesloten zode of een open zode) worden in het WBI2017 standtijdlijnen gegeven. Uit de kalibratiestudie GEBU (Gras Erosie Buitentalud) [15] voor gras op klei blijkt dat voor de rekenwaarde van de standtijdlijn de 5% ondergrenswaarde geldt, zonder verdere veiligheidsfactoren. Dit betekent dat de standtijdlijn aan de lage kant van de proefwaarnemingen zal komen te liggen. Voor gras op zand zal in een volgende fase van het gras op zandproject: 'P9 Kalibratiestudie', worden gekeken of dit veiligheidsformat specifiek voor gras op zand eventueel moet worden aangepast.

### 2.2 Modellerings

De standtijdlijnen geven de relatie tussen de standtijd van de grasbekleding  $t_{falen}$  (uur) en de significante golfhoogte  $H_{m0}$  (m). De lijnen worden [15] beschreven door de volgende formule.

$H_{m0} = ae^{bt_{falen}} + c$  of, omgeschreven:

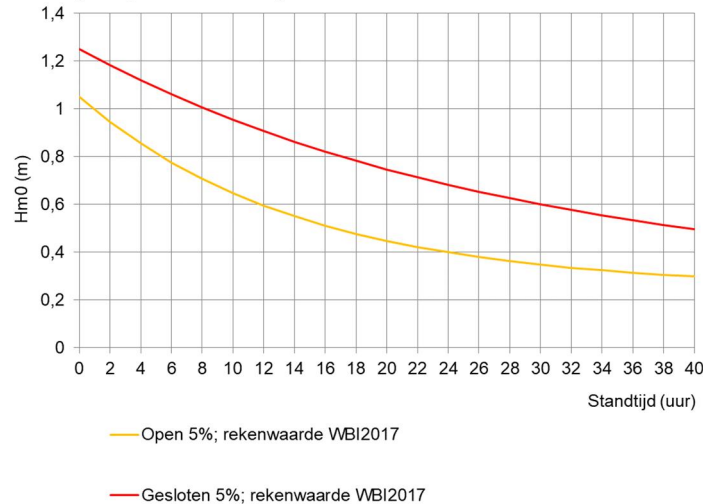
$$t_{falen} = \frac{1}{b} \ln \left( \frac{H_{m0} - c}{a} \right)$$

$a$  (m),  $b$  (1/uur) en  $c$  (m) zijn de parameters die de ligging van de lijn bepalen. Parameter  $b$  is hierbij negatief.  $H_{m0}$  is gemaximaliseerd op  $a+c$ , omdat standtijden enkel nul of positief kunnen zijn,

De rekenwaarden van de standtijdlijnen voor gras op klei (open en gesloten zode) worden gegeven in Figuur 2.1. De standtijdlijn wordt gegeven tot een duur van 40 uur. Voor een groot deel van de Vechtdijk is vooral de waarde bij 12 uur van belang. Voor afvoer gedomineerde watersystemen wordt in de gedetailleerde toets bij de beoordeling namelijk uitgegaan van een continue belasting van 12 uur bij een stagnant waterpeil. Voor andere gras op zanddijken, waarbij stormopzet is te verwachten is het wel noodzakelijk om de hele standtijdlijn beschikbaar te hebben.

Parameter  $c$  (m), vormt de asymptoot aan de onderzijde van de standtijd. Voor een  $H_{m0}$  die nadert naar  $c$  gaat de standtijd  $t_{falen}$  naar oneindig. Voor gras op klei wordt hiervoor een waarde van 0,25 m aangehouden. De waarde van  $b$  (1/u) bepaalt de kromming van de lijn, hoe groter negatief de

waarde hoe krommer de lijn. De waarde van  $a$  (m) bepaalt samen met  $c$  de significante golfhoogte bij een standtijd van 0 uur. Dit is de significante golfhoogte waarbij rekenkundig instantaan falen van de toplaag wordt voorspeld.



Figuur 2.1 Rekenwaarden van de standtijdlijnen voor gras op klei

Het model van standtijdlijnen voor gras op een substraat van klei is in hoofdzaak empirisch en gebaseerd op een relatief beperkt aantal proeven en waarnemingen uit het veld ([18], [19]).

Het hanteren van dezelfde formulering voor gras op zand betekent dat voor gras op zand gebruik kan worden gemaakt van het bestaande instrumentarium, waaronder software, voor de beoordeling. Alleen de te hanteren parameters zijn anders. Eventuele aanpassing van het standtijdmodel ligt buiten de scope van het project.

## 2.3 Proefbeschrijving

Er zijn in het stormseizoen van 2020/2021 op drie locaties golfklapproeven uitgevoerd op het buitentalud van de Vechtdijk. De resultaten van deze proeven zijn gerapporteerd in [1]. Eerder zijn golfklapproeven uitgevoerd op de IJsseldijk voor het project Zwolle - Olst [11] en er zijn golfklapproeven uitgevoerd in het kader van reststerkte-onderzoek voor het WBI2017. Een overzicht van deze proeven op gras op zand zijn gegeven in [12]. Deze paragraaf geeft een samenvatting van de resultaten.

De drie proeven op de Vechtdijk zijn uitgevoerd op de locaties zoals aangegeven in Tabel 2.1. De locaties zijn in samenhang met de locaties voor golfverslagproeven gekozen, op basis van variatie in de aanwezige vegetatie, met name de bedekking. De variabiliteit in de bodem is gering (zie [9] en Paragraaf 3.8.1). Het talud met de slechtste bedekking van slechts 60% in het voorjaar van 2020, is tijdens de zomer en herfst opgeklimmen tot een bedekking van 80% (de proeven zijn uitgevoerd in de maanden januari – maart 2021). Daarmee hoort het talud, tijdens de testen, niet tot de slechtst bedekte taluds langs de Vechtdijk (Tabel 3.7). De drie taluds zijn naar verwachting op basis van de vooronderzoeken [3] een representatie van een relatief sterke grasmat (1A), een relatief zwakke grasmat (2A) en een middenmoot (3A).



Tabel 2.1 Locaties golfklapproeven Vechtdijk en bedekking van de vegetatie

Locatie	Bedekking voorjaar 2020 Totaal (gras/ kruiden)	Bedekking najaar 2020 Totaal
53-3 dijkpaal 103,4 buitentalud – 1A	93% (91% gras 9% kruiden)	89%
9-1 dijkpaal 14.0 buitentalud – 2A	60% (50% gras 50% kruiden)	80%
9-1 dijkpaal 18.2 buitentalud – 3A	83% (74% gras 26% kruiden)	91%

Het proefprogramma voor de golfklapproeven wordt beschreven in [1]. Dit komt neer op het genereren van klappen op het talud, waarvan de piekdrukken overeenkomen met de piekdruk door golfklappen op een talud van circa 1:3,5 à 1:4 door een significante golfhoogte van 0,6 à 0,7 m (zie [16], [17] en [23]). Hierbij worden de 2% hoogste piekdrukken niet gegenereerd, evenals de 67% laagste piekdrukken. Voor gras op een substraat van klei is de schade-ontwikkeling door de golfklapgenerator vergeleken met proefstukken die zijn beproefd in de Deltagoot. Hierbij bleek dat de gegenereerde golfklappen een vergelijkbare schadeontwikkeling gaven als in de Deltagoot bij een significante golfhoogte in de orde van 0,6 à 0,7 m. Verwacht wordt dat de gegenereerde 31% van de golfklappen ook voor gras op zand in hoofdzaak bijdraagt aan schade en eventueel falen van de grasbekleding.

De proeven worden uitgevoerd in cycli. In één cyclus worden 60 volumes losgelaten uit de golfklapgenerator. Daarbij wordt na 20 en 40 volumes de positie van de generator circa 0,4 m hoger of lager langs het talud verplaatst, zodat niet alle golfklappen op dezelfde plek komen, maar enigszins verdeeld worden over een deel van het talud. Na het 60<sup>ste</sup> volume wordt de generator weer naar de eerste positie verplaatst. Voor verdere details met betrekking tot de uitvoering wordt verwezen naar [1].

In de onderstaande figuren wordt een beeld geschetst van de ontwikkeling van de schade bij de drie proeven 1A, 2A en 3A (Figuur 2.2, Figuur 2.3 en Figuur 2.4). De foto's zijn overgenomen uit [1].



Figuur 2.2 Schadeontwikkeling Testsectie 1A (van links boven met de klok mee: voor de start, na 52 cycli, na 88 cycli en na 124 cycli) Geen falen toplaag





Figuur 2.3 Schadeontwikkeling Testsectie 2A (van links boven met de klok mee: voor de start, na 24 cycli, na 32 cycli en na 36 cycli) falen toplaag



Figuur 2.4 Schadeontwikkeling Testsectie 3A (van links boven met de klok mee: voor de start, na 28 cycli, na 52 cycli en na 69 cycli) falen toplaag

Na een gegeneerde stormduur van 15,9 uur, meer dan de rekenkundige belastingduur langs de Vecht van 12 uur, is er geen falen opgetreden bij Testsectie 1A. Deze testsectie was op voorhand, op basis van de hoge bedekking, al aangemerkt als erosiebestendig. Vanwege projectmatige overwegingen is de proef gestopt voordat falen optrad. De maximale erosiediepte was inmiddels wel toegenomen tot bijna 40 cm, waardoor achteraf vermoed wordt dat falen niet heel lang meer op zich had laten wachten. In Paragraaf 3.4 wordt de definitie van falen nader toegelicht en door enkele foto's geïllustreerd. Tijdens de proef is waargenomen dat er water in de ontstane erosiekuil bleef staan, hetgeen ook gebeurde bij de andere golfklapproeven.

Op Testsectie 2A is na een gegeneerde stormduur van 4,4 uur de grasbekleding bezwaken. Na bezwijken is de proef nog even doorgezet, om te kijken naar het verdere verloop van erosie. De toename van de ontgroning ging relatief snel, zand verdween uit de kern, de bovenrand van de toplaag werd hierdoor ondermijnd en brokkelde af. Deze locatie was op basis van een lagere bedekking op voorhand aangemerkt als het zwakste talud [3].

Op Testsectie 3A is na een gegeneerde stormduur van 8,7 uur de grasbekleding bezwaken. De foto's voor deze testsectie laten zien dat er bij het ontwikkelen van de erosiekuil water in de kuil blijft staan (hetgeen ook bij de andere twee proeven is waargenomen). De golfvolumes voor de cycli die het profiel aan de onderzijde raken zullen in het water vallen, waardoor de piekdrukken en allicht de erosie minder is dan dat de volumes niet in het water vallen. Het zou kunnen dat in werkelijkheid ook een dergelijk mechanisme optreedt, maar dit is enigszins onzeker. In [16] wordt de schadeontwikkeling tussen proeven met de golfklapproeven en de Deltagoot vergeleken, het is echter niet helemaal zeker of bij deze golfklapproeven ook water in de kuil is blijven staan.

Eerdere proeven op de IJsseldijk voor Zwolle - Olst (twee proeven) en de twee proeven die zijn uitgevoerd in het kader van het WBI2017 (Be.1 en Ol.3), zijn eerder in het kader van dit project gerapporteerd in [3].

Uit het verleden zijn tevens twee proeven bekend met een regelmatige golfhoogte van 0,24 m en 0,26 m in een golfgoot. Het standtijdmodel gaat echter uit van een spectrale golfhoogte  $H_{m0}$ . Een equivalente spectrale golfhoogte zal waarschijnlijk iets hoger zijn dan de gebruikte regelmatige golfhoogte, echter onbekend is hoeveel. Binnen het kader van dit project is dit niet verder onderzocht. De eerste proef was op een proefstuk van gras op zand gestoken bij Terwolde. Na 168 uur was er geen sprake van falen. De tweede proef was op een proefstuk gestoken bij Twello. Dit proefstuk was echter gescheurd voor de beproeving en faalde na 6 uur bij een golfhoogte van 0,26 m. Vanwege de schade aan het proefstuk als gevolg van het steken, vervoeren en inbouwen van het monster is deze proef als niet representatief beschouwd en niet meegenomen bij de verdere analyse. Hierbij geldt echter de kanttekening dat de breuk is voortgekomen uit een zwakte van het proefstuk die in het veld al aanwezig was, maar daar niet is opgevallen. De proeven zijn uitgevoerd in een reeks waarbij ook proefstukken van gras op klei zijn beproefd bij relatief lage golven in een golfgoot [13] en [5].



## 2.4 Samenvatting van de proefresultaten

De proefresultaten in termen van standtijd, inclusief hierbij te plaatsen opmerkingen, zijn samengevat in Tabel 2.2. Voor meer informatie over de bedekking van de eerste drie proeven, testsecties 1A, 2A en 3A wordt verwezen naar Paragraaf 3.8.

Tabel 2.2 Samenvatting resultaten beschikbare golfklapproeven met de golfklapproefgenerator voor gras op zand taluds

Locatie	Standtijd golfklapproef (uur)	Opmerkingen
53-3 dijkpaal 103,4 – Testsectie 1A	15,9	Vechtdijk 2021, nog geen falen
9-1 dijkpaal 14.0 – Testsectie 2A	4,4	Vechtdijk 2021, falen
9-1 dijkpaal 18.2 – Testsectie 3A	8,7	Vechtdijk 2021, falen
IJsseldijk A [11] en [3]	3,4	IJsseldijk 2020, kuil 0,2 m diep (mogelijk geen falen toplaag)
IJsseldijk B [11] en [3]	5,2	IJsseldijk 2020, kuil 0,2 m diep (mogelijk geen falen toplaag)
Berkum Be. 1 [3]	3,6	Berkum 2013, op voorhand schade aangebracht; bedekking 98%
Olst Ol. 3 [3]	2,4	Olst 2013, lage bedekking, 64%

Voor IJsseldijk A en B is destijds gekozen voor een faaldefinitie van een erosiediepte van 0,2 m over een oppervlak van minimaal 0,2x0,2 m<sup>2</sup> [11]. Er was toen echter nog geen sprake van een doorbraak van de toplaag, zoals waargenomen bij de proeven op de Vechtdijk, waarbij ineens los zand van onder de toplaag wegspoelt. Een doorbraak van de toplaag is niet opgetreden voor IJsseldijk B na een proefduur van 7 uur. Voor IJsseldijk A is dit niet opgetreden na een proefduur van 12 uur. De erosiediepte was op dat moment al wel 0,6 m over een oppervlak van 0,2x0,2 m<sup>2</sup>. Onbekend is of er hier sprake was van een toplaag zoals waargenomen bij de Vechtdijk, of dat hier sprake was van een onderlaag onder de toplaag die om andere redenen erosiebestendig bleek (zie voor de beschrijving van 'toplaag' Paragraaf 3.4).

De variatie in standtijden bij de golfklapproeven is zeer groot. De bedekking blijkt op het eerste gezicht een belangrijke factor, gezien de goede prestatie van Testsectie 1A met een hoge bedekking en de slechte prestatie van Olst Ol. 3 met een zeer lage bedekking. Er is echter onvoldoende data om hierin onderscheid te maken. Daarnaast is de bedekking behoorlijk variabel in de tijd (voorjaarsopname versus najaarsopname) en variabel over de hoogte van het talud. Ook droogte kan één of enkele jaren zorgen voor een mindere bedekking, waarna eerst pioniers en/ of meer droogte resistente kruiden zoals smalle weegbree en duizendblad het talud overnemen, allicht in de seizoenen daarop weer gevolgd door grassen. Dit maakt het zeer lastig om een voorwaarde te definiëren ten aanzien van de bedekking. In het WBI2017 worden hiervoor wel richtlijnen gegeven, maar deze zijn niet doorslaggevend ten opzichte van de dichtheid van het wortelnet, dat middels het steken van een plag kan worden gecontroleerd.

Enkele van de datapunten zijn aan de conservatieve kant. De proef Berkum Be.1 had namelijk een vooraf aangebrachte schade en de proeven IJsseldijk A en B waren conform de definitie falen van de toplaag nog niet gefaald. . Daar tegenover staat dat proefstroken met een zeer lage bedekking (60 à 70%) ondervertegenwoordigd zijn. Ook het proefstuk Twello dat beproeft is bij een regelmatige golfhoogte van 0,26 m is buiten beschouwing gelaten, vanwege schade als gevolg van monsternamen en/ of inbouwen. Dit kan echter al een zwakke

plek zijn geweest die aanwezig was in het veld, maar daar bij monsternamen niet is opgevallen.

## 2.5 Standtijdlijnen gras op zand

Verondersteld wordt dat de standtijdlijn, het empirische model voor gras op klei, ook voor gras op zand kan worden gebruikt.

De golfklapproeven op de Vechtdijk laten een vergelijkbaar faalproces zien als waargenomen bij gras op klei. Er is sprake van een goed gedefinieerde toplaag, die na een bepaalde tijd onder een gegeneerde golfklapbelasting doorbreekt, waarna erosie van de onderliggende grond (in dit geval zand) relatief snel gaat. De toplaag bestaat net als bij gras op klei uit een bovenste laagje van circa 0,1 m met een zeer hoge worteldichtheid en daaronder een minder sterk doorwortelde laag, welke ondanks dat het zand betreft, nog relatief lang stand houdt. Pas als ook deze tweede laag doorbreekt gaat het erosieproces ineens veel sneller. De grens tussen de toplaag en het hieronder liggende losse zand is vrij scherp. Afwijkend van gras op klei is de dikte van de toplaag. Deze is bij grasbekleding op een substraat van klei vaak dunner, namelijk in de orde van 0,2 m, tegen circa 0,3 à 0,4 m voor gras op zand.

Evenals voor gras op klei leidt een lage golfhoogte (regelmatige golfhoogte van 0,24 m) tot een zeer hoge standtijd en golfklapproeven bij een gegeneerde significante golfhoogte van 0,65 m tot een standtijd in de orde van uren. Helaas ontbreken proeven bij andere golfhoogtes, waardoor maar in beperkte mate kan worden aangetoond dat het empirische model ook passend is voor het voorspellen van het falen van grasbekledingen op zand.

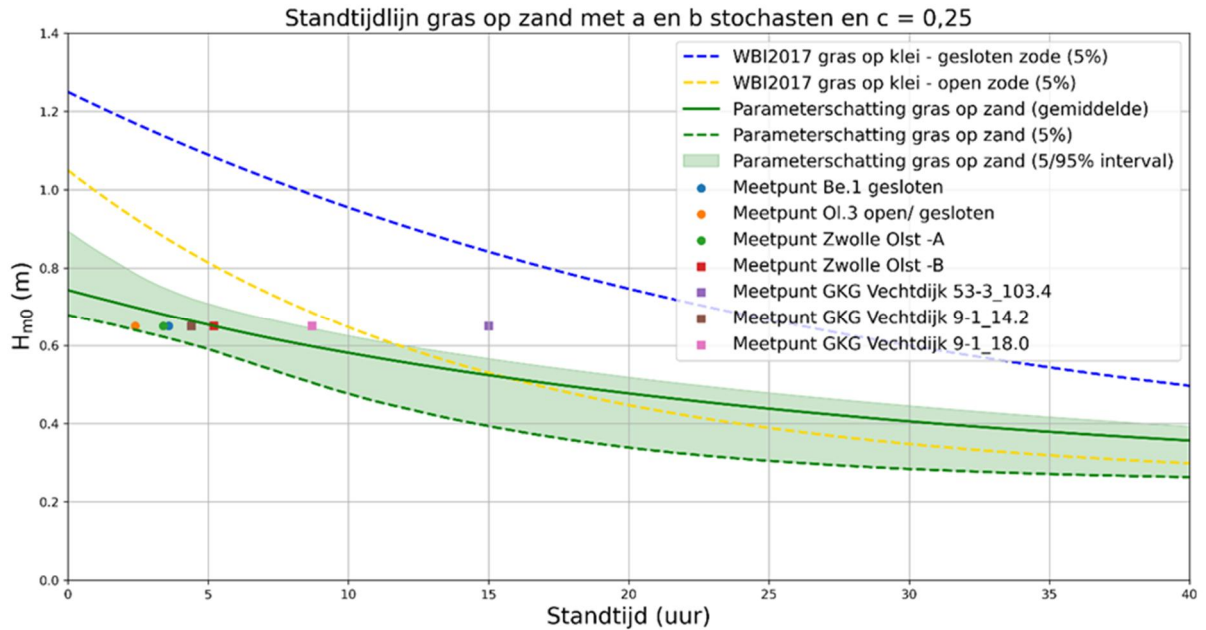
Met de beschikbare proefresultaten van gras op zand zijn de parameters van de standtijdlijn voor gras op zand berekend. Dit is gedaan op basis van Bayesian Parameter Estimation. Daarbij wordt op basis van de datapunten een a-priori verdeling van parameters geüpdatet. Deze methode is geschikt om parameters te schatten op basis van een beperkt aantal datapunten omdat de methode goed in staat is de onzekerheid in de data in beeld te brengen.

Bij deze aanpak worden eerst a priori kansverdelingen voor de onzekere parameters gedefinieerd. Vervolgens worden met behulp van Markov Chain Monte Carlo samples uit de meetpunten getrokken, en gebruikt om de kansverdelingen te updaten. Door middel van Bayes rule wordt vervolgens de a posteriori kansverdeling bepaald. Door dit veelvuldig te herhalen voor verschillende samples van meetpunten geeft dit ook een beeld van de onzekerheid in de parameters. Gedetailleerde informatie over deze methode is terug te vinden in [20]. Een ander voordeel van deze methode is dat de a priori kansverdeling weinig invloed heeft op het resultaat, dus ook wanneer deze lastig te bepalen zijn is de methode goed bruikbaar.

De standtijdlijn van gras op klei heeft drie parameters: a (stochastisch), b (deterministisch) en c (deterministisch). Deze keuze voor de beschrijving van de parameters voor gras op klei is overgenomen voor gras op zand. Uitgaande van een zeer lange standtijd voor een kleine golfhoogte [13] is parameter c uit het model gelijk genomen aan 0,25 m. De kansverdeling van parameter a kan worden bepaald met de Bayesian Parameter Estimation. Hiervoor wordt een uniforme a priori verdeling aangenomen, met als ondergrens 0,1 en bovengrens 4.

De parameter b is moeilijk te bepalen. Omdat er alleen informatie over de standtijd beschikbaar is bij twee golfhoogtes en de formule voor de standtijdlijn 3 variabelen heeft is b wiskundig onbepaald. Parameter b heeft geen expliciete fysische betekenis. Parameter b bepaalt de kromming van de standtijdlijn. In Figuur 2.5 staat het resultaat van de analyse

indien zowel parameter a als b als stochast wordt beschouwd en voor parameters c een deterministische waarde van 0,25 m wordt aangehouden.



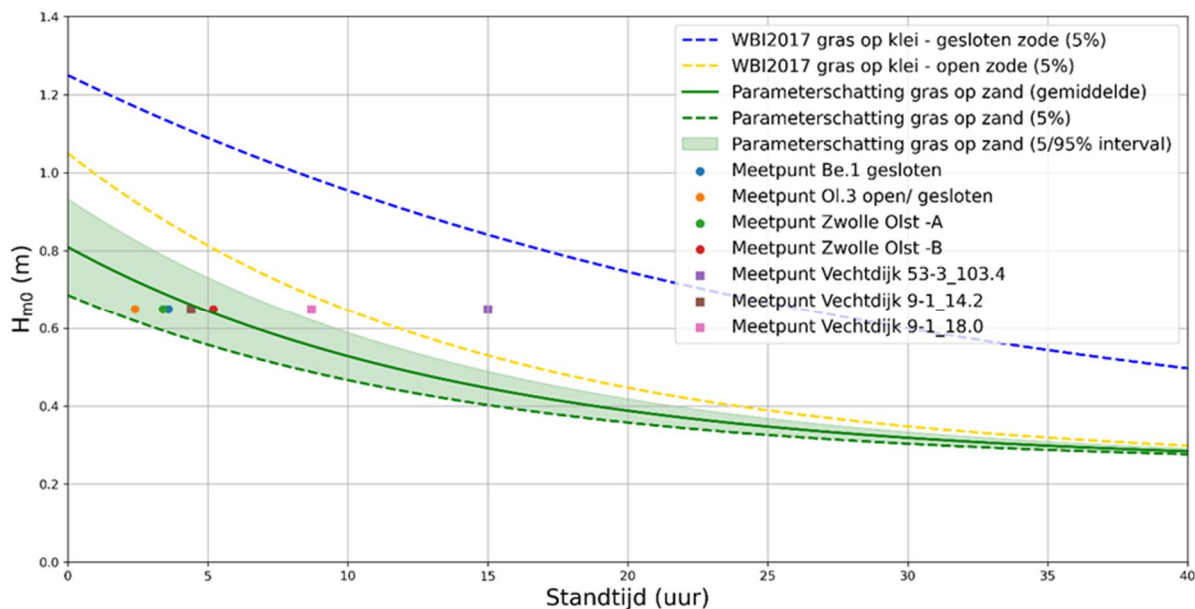
Figuur 2.5 Schatting van de standtijdlijnen gras op zand op basis van de 5% ondergrens en het gemiddelde a-waarde en b-waarde stochastisch en c-waarde deterministisch 0,25 m

Het resultaat van een stochastische b leidt tot een lijn die niet past binnen het huidige instrumentarium voor gras op klei en het daardoor niet kunnen toepassen hiervan.

Er is tevens gekeken naar deterministisch b-waarden, net zoals voor gras op klei. Er is gekeken in de range tussen -0,1 en -0,07, gebaseerd op de b-waarde van gras op klei. Voor de uitwerking deze variatiestudie zie Bijlage E. Uit de analyse van deze vier b waarden (-0,1, -0,09, -0,08 en -0,07), zie Bijlage E, is op basis van de volgende argumenten gekozen voor b = -0,07:

- De standaarddeviatie van de observaties gesampled uit de data heeft de kleinste waarde voor een b van -0,07.
- De standtijd voor een golfhoogte van (iets hoger dan) 0,25 m. Met een b-waarde van -0,1 en -0,09 was de standtijd 30 uur. Met een b-waarde van -0,07 was de standtijd 40 uur, wat meer realistisch geacht wordt op basis van [13].

Met de b-waarde van -0,07, is de analyse uitgevoerd om de posterior distributie van a te vinden. Hieruit bleek a normaal verdeeld te zijn (met gemiddelde 0,56 en standaarddeviatie 0,075). Omdat deze parameter niet negatief kan worden moet deze afgekapt worden op 0. Figuur 2.6 geeft de resulterende standtijdlijn, inclusief onzekerheid, en 5% en gemiddelde waarde (in groen).

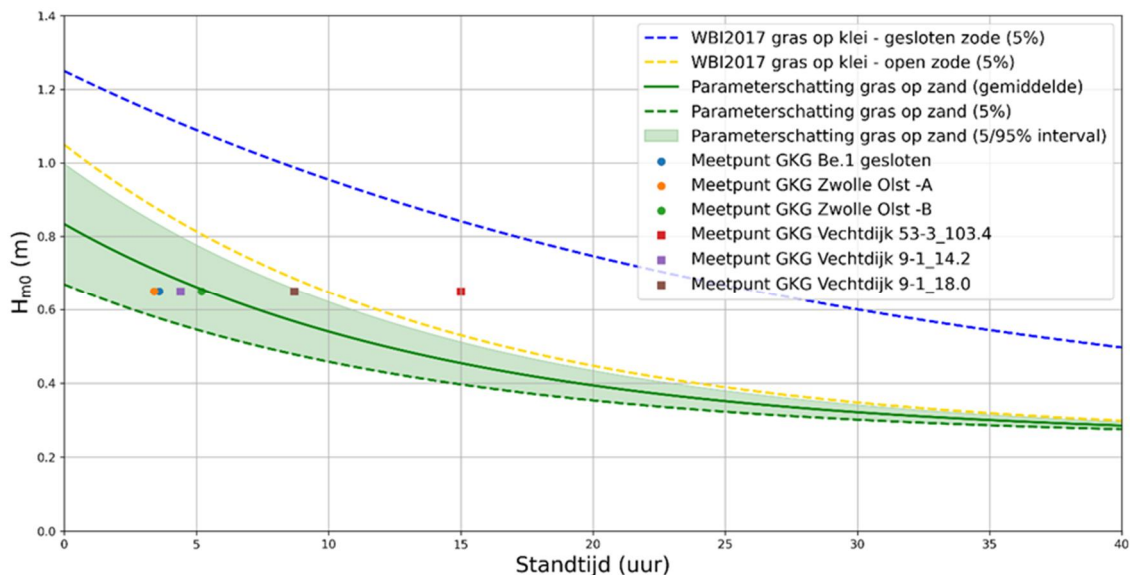


Figuur 2.6 Schatting van de standtijdlijnen gras op zand op basis van de 5% ondergrens en het gemiddelde  $a$ -waarde, een  $b$  waarde van  $-0,07$  en een  $c$  waarde van  $0,25$

Voor de Vechtdijk is met name de rekenwaarde van de golfhoogte bij een standtijd van 12 uur van belang. Indien er vanuit wordt gegaan dat voor gras op zand, net als bij gras op klei met een 5% representatieve waarde moet worden gerekend dan leidt dit tot een maximale golfhoogte van iets meer dan 0,4 m bij de doorsnede-eis voor GEBU. Dit zal in P9 Kalibratie nader worden uitgewerkt. Hierbij wordt opgemerkt dat er in dit geval enkel wordt gekeken naar falen van de grasbekleding en geen rekening wordt gehouden met erosie van de zandkern die ook noodzakelijk is voordat er sprake is van een doorbraak en daarna een overstroming. Opgemerkt wordt dat er mogelijkheden zijn om de continue belasting van 12 uur te optimaliseren.

Volgens de grafiek is de onzekerheid over de kritische golfhoogte bij een lange standtijd zeer klein. Dit is een gevolg van de dwingende voorwaarde van geen falen bij een  $H_{m0}$  van 0,25 m of minder. Het is wel zeer waarschijnlijk dat de bekleding niet faalt bij  $H_{m0} = 0,25$  m, echter er is in tegenstelling tot wat de grafiek zegt wel een redelijke kans dat de bekleding niet faalt bij een hoogte van bijvoorbeeld 0,3 m. Binnen de kaders van de beoordeling is echter alleen de linkerkzijde van de grafiek van belang.

Van de gebruikte datapunten geldt voor Ol. 3 dat deze andere karakteristieken heeft dan de Vechtdijk en de IJsseldijk, en daardoor vermoedelijk een zeer lage standtijd. Dit datapunt betreft een steil talud langs een vaart, waarbij het beheer en onderhoud van de bekleding heeft geleid tot een zeer lage bedekking. Volgens de WBI-beoordeling was deze tussen open en gesloten in. Om de invloed hiervan te bepalen is analyse ook uitgevoerd zonder dit datapunt (Figuur 2.7). Dit heeft nauwelijks invloed op de kansverdeling van  $a$  (gemiddelde waarde van 0,58 en standaard deviatie van 0,1). De golfhoogte voor een standtijd van 12 uur was 0,43 m. Omdat de resultaten met en zonder dit datapunt niet veel verschillen is besloten om dit datapunt wel mee te nemen in de analyse, wat de toepasbaarheid ten goede komt.



Figuur 2.7 Schatting van de standtijdlijnen gras op zand op basis van de 5% ondergrens en het gemiddelde a-waarde, een b waarde van -0,07 en een c waarde van 0,25. Zonder datapunt Ol.3

Het voorstel is om de lijnen uit Figuur 2.6 te gebruiken om in de volgende fase P9 Kalibratie te bepalen wat goede rekenwaarden zijn voor de veiligheidsbeoordeling.

De proeven zijn voor zover bekend allemaal uitgevoerd op een 'gesloten zode' conform het WBI2017. Dit hoort dan ook bij de uitgangspunten voor de standtijdlijnen.

Met uitzondering van de handmatig aangebrachte schade tot een diepte van 0,2 m bij Berkum Be. 1, zijn in de teststroken geen andere graverijen van mollen, konijnen en dergelijke meegenomen. Zonder verdere onderbouwing is de verwachting dat bij graverij rond de waterlijn bij een golfklapbelasting de standtijd significant zal verminderen, ofwel de rekenwaarde van de golfhoogte bij een benodigde standtijd van 12 uur zal verlagen ten opzichte van 0,4 m. De bruikbaarheid van de lijnen wordt in dat geval twijfelachtig. De kans op een overstrooming wordt in dat geval vooral bepaald door inspectie voor hoogwater, het kunnen treffen van maatregelen voor hoogwater, de aanwezige reststerke van de zandkern en eventueel maatregelen tijdens hoogwater. Over hoe dit in een veiligheidsoordeel kan worden meegenomen en eventueel kan worden afgewogen tegen de maatregel van een kleilaag worden handvatten gegeven in Hoofdstuk 4 en Bijlage D.



## 3 Erosie door golfoverslag

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt op basis van de resultaten van de uitgevoerde grootschalige golfoverslagproeven op de Vechtdijk en op basis van eerdere proeven op gras op zand een kansverdeling van  $U_c$  gegeven.

Het doel is om deze kansverdeling toe te passen bij het beoordelen op veiligheid van zanddijken met een gras op zand bekleding en voor scope bepalende berekeningen voor de versterking van de Vechtdijk. Afhankelijk van de ontwikkelingen bij het BOI2023 kan dit direct, als de cumulatieve overbelastingmethode direct wordt geïmplementeerd of indirect via af te leiden kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet. De afleiding van een kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet valt onder het volgende product P9.

### 3.2 Model en terugrekenprocedure $U_c$

#### 3.2.1 Model

Erosie van de grasbekleding wordt voorspeld met de cumulatieve overbelastingmethode. De belasting wordt gekarakteriseerd door de frontsnelheid van de over de dijk stromende golf  $U$  (m/s) en de sterkte of erosiebestendigheid wordt gekarakteriseerd de kritische frontsnelheid  $U_c$  (m/s). Golven waarbij de frontsnelheid in het kwadraat de kritische frontsnelheid in het kwadraat overschrijdt laat het schadegetal  $D$  ( $m^2/s^2$ ) toenemen. Bij het bereiken van de kritische waarde van  $D$  wordt bezwijken van de grasbekleding voorspeld. De formule inclusief invloedsfactoren is als volgt:

$$D = \sum_{i=1}^N \max\left(0; \alpha_M (\alpha_a U_i)^2 - \alpha_s U_c^2\right)$$

Waarin:

$D$ ( $m^2/s^2$ )	schadegetal.
$N$ (-)	aantal overslaande golven.
$U_i$ (m/s)	frontsnelheid per overslaande golf op de kruin van de dijk.
$U_c$ (m/s)	kritische snelheid (erosiebestendigheidsparemeter van de toplaag).
$\alpha_M$ (-)	correctiefactor op de belasting als gevolg van een overgang.
$\alpha_s$ (-)	correctiefactor op de sterkte als gevolg van een overgang.
$\alpha_a$ (-)	correctiefactor voor versnelling van de frontsnelheid op een talud.

Op basis van waarnemingen bij grootschalige proeven zijn de volgende schadebeelden gekoppeld aan  $D$ :

$D=1000$ $m^2/s^2$	begin schade (of eerste schade).
$D=4000$ $m^2/s^2$	meerdere kale plekken.
$D=7000$ $m^2/s^2$	doorbraak toplaag, bezwijken grasbekleding.

Het model is gekalibreerd uitgaande van bezwijken van de grasbekleding ( $D=7000$   $m^2/s^2$ ). Hierbij geldt dat de beelden eerste schade en meerdere kale plekken veel minder goed te voorspellen zijn dan het bezwijken van de toplaag. Het verschil in  $D$  tussen deze schadebeelden en bezwijken, uitgaande van een  $U_c$  op basis van bezwijken van de toplaag, was relatief variabel. Soms trad vrij snel na het ontstaan van schade ook bezwijken van de grasbekleding op en soms duurde dit juist relatief lang.

Voor gras op zand is een vergelijkbaar gedrag waargenomen van eerste schade tot falen van de topklaag als voor gras op klei (zie paragraaf 3.4).

### 3.2.2 Terugrekenprocedure $U_c$

In de volgende paragrafen 3.3 tot en met 3.6 wordt achtereenvolgens ingegaan op het bepalen van de opgelegde belasting tijdens de golfoverslagproeven en op het terugrekenen van de aanwezige sterkte gekarakteriseerd door  $U_c$ . In deze paragraaf wordt de procedure en de gehanteerde aannames bij het terugrekenen van de  $U_c$  toegelicht.

Het model is grotendeels empirisch. De belasting in het model moet dan ook worden gezien als een karakterisering van de werkelijke belasting en de sterkte in het model als een karakterisering van de sterkte.

De belasting in het model bestaat uit  $\alpha_a U_i$ . Dit is de versnellingsfactor voor op taluds keer de frontsnelheid op de kruin. In werkelijkheid zal een bepaalde waterstand in combinatie met golfcondities leiden tot een bepaald golfoverslagdebiet, bestaande uit een verdeling van golfoverslagvolumes en een verdeling van frontsnelheden op de kruin. Afhankelijk van de kruinbreedte, taludgeometrie en ruwheid zal versnelling van de frontsnelheid optreden. Bij de golfoverslagproeven wordt deze belasting gesimuleerd. Op basis van [21] is uitgaande van een golfoverslagdebiet en golfcondities, de verdeling van golfoverslagvolumes bepaald. Deze volumes worden door de simulator over de dijk losgelaten, leidend tot een verdeling van  $U_i$  op de kruin. De terugrekening van de  $U_c$  heeft plaatsgevonden met een benadering van lokale  $U_i$  op de plek waar schade of falen optrad, ofwel een benadering  $\alpha_a U_i$  (Paragraaf 3.3). De door de simulator gegenereerde frontsnelheden op de kruin en het talud en die in werkelijkheid zullen optreden zullen tot in zekere mate afwijkend zijn. Hier is verder geen rekening mee gehouden bij het terugrekenen van de  $U_c$ . Er wordt aldus vanuit gegaan dat de simulator de werkelijkheid voldoende benadert.

Het model bevat twee coëfficiënten  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$ , waarmee de invloed van overgangen en objecten kan worden verdisconteerd. De Vechtdijk heeft relatief weinig overgangen en objecten. Op enkele strekkingen is op de kruin van de dijk een (fiets)pad aanwezig. Bij aanvang van het project is afgesproken de invloed van overgangen en objecten in termen van  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$  niet specifiek te onderzoeken [14]. In de proeven wordt conform afspraak wel het aanwezige fietspad op de kruin meegenomen, echter de invloed hiervan wordt verwerkt in de  $U_c$ . Bij het terugrekenen van  $U_c$  zijn de coëfficiënten  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$  gelijk aan 1,0 genomen. Dit is niet zuiver, omdat in het geval van een overgang onzekerheden in de  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$  tot uiting kunnen komen in de onzekerheid van de  $U_c$ . Deze keuze heeft echter waarschijnlijk niet veel invloed op de teruggerekende  $U_c$ , omdat de overgang op de kruin ligt waar de belasting relatief laag is, waardoor falen minder snel optreedt ondanks de aanwezigheid van deze overgang. Bij toepassing van de resultaten van dit onderzoek voor de Vechtdijk en breder moet dit echter wel helder zijn, daarom is dit ook expliciet opgenomen in de toepassingsvoorwaarden.

Bij het terugrekenen van  $U_c$  is ook de kritische waarde van  $D$  vastgehouden, volgens de criteria voor schade en falen in Paragraaf 3.2.1. Alle onzekerheden zijn daarmee verwerkt in de  $U_c$ . Hierbij wordt opgemerkt dat in de stap van de cumulatieve overbelastingmethode naar kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet de  $D$  als stochast wordt beschouwd. Hiermee worden aldus onzekerheden afgedekt die voortkomen uit deze rekenstap. Bij directe toepassing van de cumulatieve overbelastingmethode moet een deterministische waarde worden gehanteerd.

Bij het terugrekenen van de  $U_c$  uit de proefresultaten is de grootste waarde gehecht aan het falen van de grasbekleding. Hiervoor geldt het criterium van  $D=7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  en met deze  $D$  is

de  $U_c$  teruggerekend. In gevallen waar geen falen optrad, maar wel schade, is het criterium van  $D=1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  gebruikt. Indien geen falen en geen schade optrad is gekeken naar wat de  $U_c$  minimaal moet zijn geweest vanwege het niet falen.

De teruggerekende  $U_c$  per proefstrook betreft het zwakste plekje in een proefstrook, namelijk daar schade en of falen optrad. Indien geen schade of falen optrad dan zegt de minimale  $U_c$  waarbij geen falen optrad ook iets over hoe sterk het zwakste plekje moet zijn geweest. Deze zwakste plekjes karakteriseren dus de  $U_c$  van de proefstrook.

Bij de interpretatie van de  $U_c$  is gekeken naar een  $U_c$  per locatie. Op enkele locaties zijn proeven vlak naast elkaar uitgevoerd. Op het oog is de grasbekleding hier hetzelfde, waardoor ervan uit is gegaan dat er een sterke correlatie bestaat tussen de  $U_c$ . De proefresultaten op één locatie zijn gekarakteriseerd door één  $U_c$  en deze ene  $U_c$  is voor die locatie gebruikt voor het afleiden van de kansverdeling van de  $U_c$  voor gras op zand. Kortweg zijn de resultaten van de  $U_c$  voor 17 proefstroken samengevoegd (laagste resultaat geldt) tot 10  $U_c$  voor 10 locaties en zijn deze 10  $U_c$  gebruikt voor het afleiden van de kansverdeling voor de  $U_c$  voor gras op zand.

Correlaties tussen de  $U_c$  per proefstrook of per locatie met vegetatieparameters en de grastrekproefresultaten zijn niet of in zeer beperkte mate gevonden en zijn niet direct betrokken in de berekening van de kansverdeling van de  $U_c$ . De grastrekproeven en bepaling van bodem- en vegetatieparameters hebben echter wel geholpen de onderbouwing van de toepasbaarheid van de grootschalige proeven. Hierop wordt wat dieper ingegaan in paragraaf 3.8.

## 3.3 Frontsnelheden golfverslagproeven

### 3.3.1 Inleiding

Voor het terugrekenen van de kritische frontsnelheid  $U_c$  (m/s) van de grasbekleding met de cumulatieve overbelastingmethode is de frontsnelheid van de overslaande volumes nodig. Hiertoe worden vanuit praktische overwegingen formules gefit voor de relatie tussen volume, frontsnelheid en plaats op de kruin en het talud. Zo wordt voor de tienduizenden golven die tijdens de proef over het talud stromen een schatting van de frontsnelheid berekend op basis van de fit-formules.

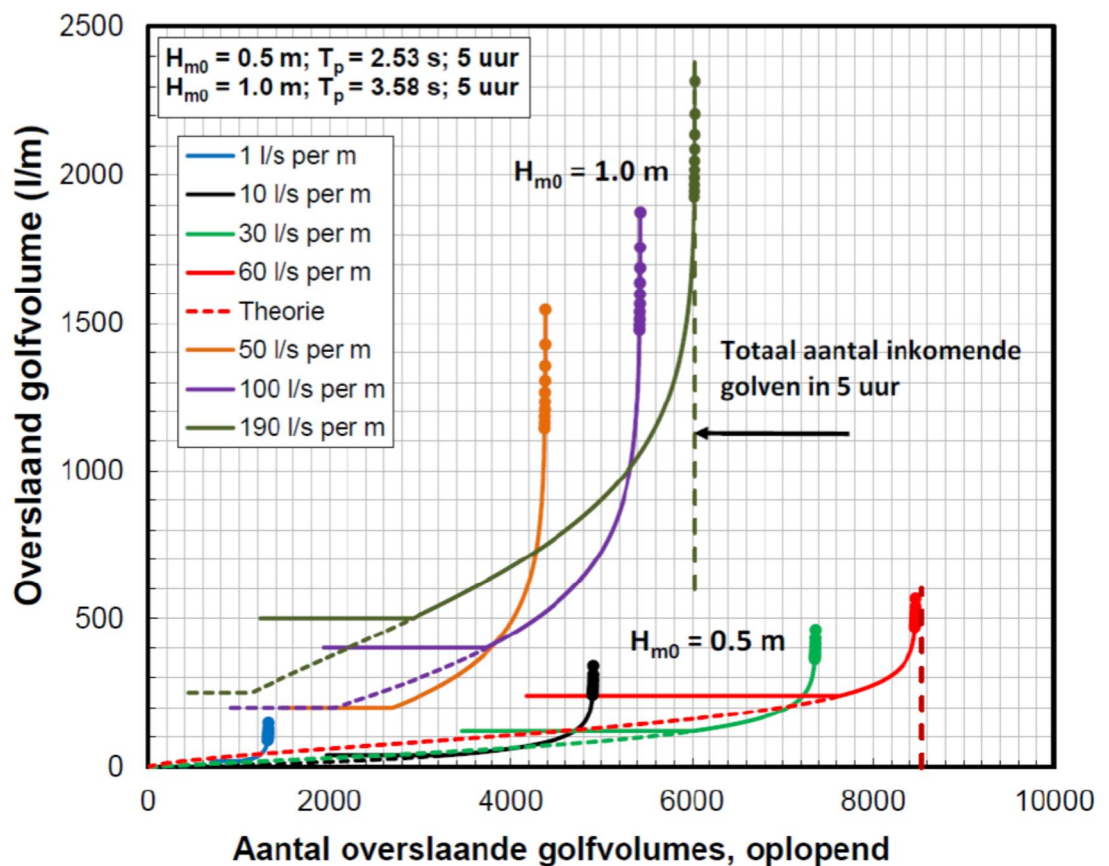
Bij alle uitgevoerde proeven zijn voor verschillende volumes de frontsnelheden bepaald, zie Bijlage H van [1]. Dit is gebeurd voor zowel de golfverslagsimulator (WOS) als de golfploopsimulator (RUS). Voor Locatie 1 zijn zowel voor de WOS als de RUS de metingen geanalyseerd, uitgewerkt en beschreven in [2]. De gefitte formules hieruit zijn overgenomen en voor de overige proefstroken zijn op soortgelijke manier fitfuncties bepaald (Bijlage C). In [2] wordt ook verder ingegaan op de geschiktheid van de beide simulatoren voor het simuleren van golfverslagbelastingen.

De frontsnelheden uit [1] zijn bepaald op basis van video-analyse. Hierbij is nagegaan hoeveel beelden nodig zijn voor de verplaatsing van het golffront over een afstand van 1 m langs het talud. Dit is gedaan langs heel het talud, vanaf de uitstroomopening tot aan de teen van het talud. Er is gemeten met een discreet aantal beelden per meter afstand. Bij hogere snelheden leidt dit tot een toenemende onnauwkeurigheid. Zo was het aantal beelden bij de hoogste snelheden bijvoorbeeld 6 of 7 beelden, hetgeen bij een frequentie van 60 Hz een frontsnelheid betekent van respectievelijk 10 m/s of 8,5 m/s. Met behulp van beeldherkenning en machine learning technieken is een meer continu beeld verkregen en vergeleken met de uitkomsten van de handmatige bepaling. (zie Bijlage A). De gepresenteerde methode biedt de mogelijkheid om relatief eenvoudig frontsnelheden bij grootschalige proeven te meten. Hiervoor wordt wel enkele eisen gesteld aan de beeldkwaliteit en markeringspunten.

De golfoverslagproeven zijn uitgevoerd met de volgende belasting, tot het einde van de belasting, of tot bezwijken van de grasbekleding (Tabel 3.1 en grafisch Figuur 3.1). De gesimuleerde stormcondities, elk met een duur van 5 uur, worden opvolgend op de proefstroken losgelaten. Voor een gedetailleerde beschrijving van de opgelegde belasting wordt verwezen naar [1] en [3].

Tabel 3.1 Karakterisering opgelegde golfoverslagbelasting [3]

Significante golfhoogte (m)	Overslagdebiet (l/s per m)	Duur (uur)	Aantal overslagvolumes (-)	Schatting grootste volume (l/m)
0,5	1	5	1318	147
0,5	10	5	4909	339
0,5	30	5	7360	462
0,5	60	5	8471	567
1,0	50	5	4376	1546
1,0	100	5	5432	1875
1,0	190	5	6032	2360



Figuur 3.1 Discretisatie van overslagvolumes volgens theorie en gesimuleerd (overgenomen uit Bijlage E [3])

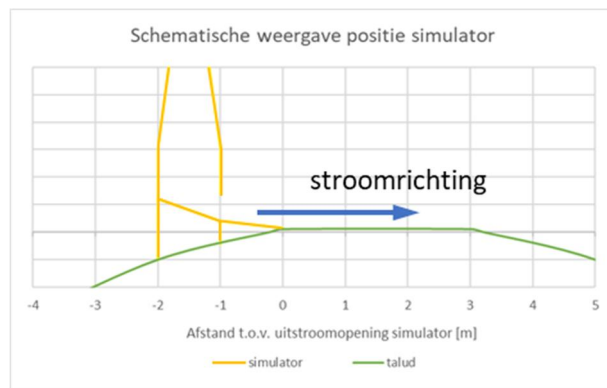
De belastingstappen worden in de navolgende tekst verkort aangeduid. De proef GO190\_1,0 betekent een golfoverslagproef bij een golfoverslagdebiet van 190 l/s per m bij een gesimuleerde golfhoogte van 1,0 m.



Voor de tijdens de proef opgelegde golfoverslagbelasting uitgewerkt in individuele volumes wordt verwezen naar [1]. Vanwege het empirische karakter van de cumulatieve overbelastingmethode is het goed om de belasting zo dicht mogelijk bij de werkelijk verwachte belasting te kiezen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de verdeling van golfoverslagvolumes uit [21]. Omdat zanddijken zich langs rivieren bevinden zijn met name significante golfhoogtes tot circa 1 m van belang. Langs de Vechtdijk zijn de significante golfhoogtes in gevallen met golfoverslag veelal lager, maximaal circa 0,5 m.

### 3.3.2 Belasting op de kruin

De golfoverslagproeven zijn allen uitgevoerd met de uitstroomopening nabij de buitenkruinlijn, om zo eventuele erosie ter plaatse van de kruin mee te kunnen nemen in het onderzoek. Bij opening van de simulatorklep valt het watervolume uit de simulator en wordt via de uitstroomconstructie in horizontale richting omgebogen richting de kruin en het talud van de dijk. Een schematische dwarsdoorsnede staat in Figuur 3.2. Op Locatie 1 was hierbij een asfaltweg op de kruin aanwezig, de uitstroomopening lag in dat geval op het asfalt.



Figuur 3.2 Dwarsdoorsnede van de simulator met uitstroomconstructie op de kruin van de dijk [1]

De ontwikkeling van een golf front, zoals die in een echte golf wordt verwacht, heeft vanuit de simulatoren enige tijd en afstand nodig, zoals beschreven in [2]. Het front van het uit de simulator vallende water loopt voor op de bulk van het volume dat er achteraan komt. Dit vertaalt zich in een nog relatief lage frontsnelheid op korte afstand van de uitstroomopening en een veel hogere maximale stroomsnelheid die wat later optreedt, zoals is gemeten bij de proeven op de IJsseldijk voor het project Zwolle Olst. Op circa 3-4 m van de uitstroomopening wordt de maximale stroomsnelheid ongeveer gelijk aan de frontsnelheid. Voor de eerste 3 m vanuit de uitstroomopening is de frontsnelheid daarom geen goede schatter voor de belasting. Voor de kruin wordt daarom conform [2] de frontsnelheid op 3 m van de uitstroomopening gebruikt als belasting in de cumulatieve overbelastingmethode in plaats van de lokale frontsnelheid. Voor de analyse en achtergrond hiervan wordt eveneens verwezen naar [2].

### 3.3.3 Ontwikkeling frontsnelheid op het binnentalud

Uit metingen [1] blijkt dat de frontsnelheid op het talud afhankelijk is van een aantal factoren. De gebruikte simulator, WOS of RUS speelt een rol, het losgelaten volume, de taludgeometrie en de afstand langs het talud (zie [2]). In het erosiemodel (zie formule in Paragraaf 3.3) wordt de frontsnelheid op het talud berekend door de frontsnelheid op de kruin  $U_i$  (m/s) te vermenigvuldigen met de versnellingsfactor  $\alpha_a$  (-). Voor het terugrekenen van de  $U_c$  (m/s) wordt echter niet gewerkt met de versnellingsfactor, maar wordt gebruik gemaakt van de gemeten lokale frontsnelheid welke wordt geschat door fitfuncties.

Grofweg kan gesteld worden dat kleine volumes tot circa 200 l/m vertragen vanaf de binnenkruinlijn (3 à 3,5 m/s) tot een snelheid van circa 2 m/s onderaan het talud. De grotere volumes, groter dan 1000 l/m, versnellen vanaf de bovenkant van het talud naar beneden. Deze versnelling vindt vooral plaats op 6 à 7 m van de uitstroomopening, ofwel 3 à 4 m van de bovenkant van het talud. Hoe groter het volume hoe langer de versnelling doorgaat en daarmee leidt tot een maximale snelheid wat verder van de uitstroomopening.

In [2] zijn formules afgeleid voor de relatie tussen de frontnelheid en het volume voor verschillende afstanden vanaf de uitstroomopening. Dit is gedaan voor Locatie 1, stroken 1-1a en 1-1b voor respectievelijk proeven met de RUS en WOS. Voor de overige locaties zijn op een soortgelijke manier formules afgeleid (Bijlage C). De formules worden gebruikt om per volume in de stuurlijst van de proeven de belasting in de cumulatieve overbelastingmethode te berekenen, waarbij wordt meegenomen op welke plek vanaf de uitstroomopening schade en of bezwijken optrad. De stuurlijsten worden gebruikt voor de aansturing van de simulatoren en bevatten de door de simulator los te laten volumes.

De formules voor het benaderen van de metingen zijn van de vorm:

$$U = aV^b$$

Waarin:

U Frontnelheid (m/s).

V Volume uit de simulator (m<sup>3</sup>/m).

a,b Fit parameters.

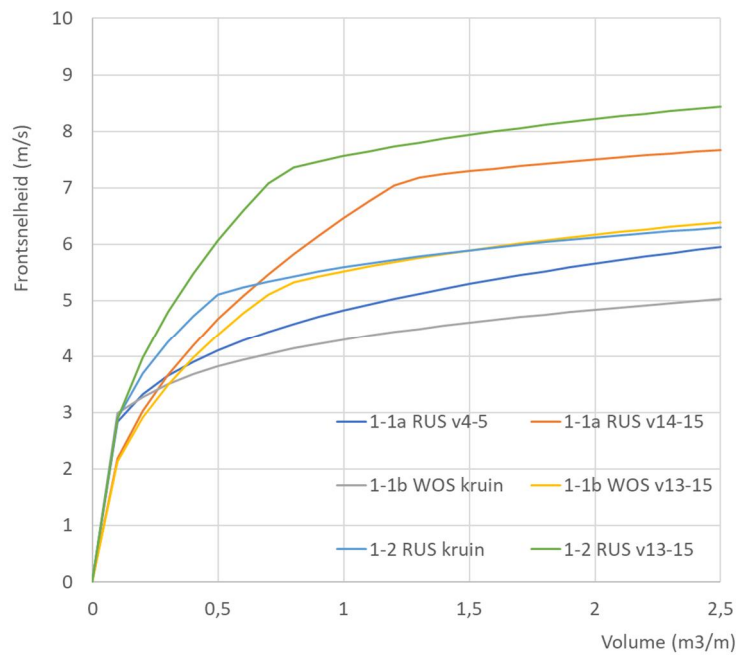
Zoals in [2] geconstateerd worden de metingen veelal nauwkeuriger benaderd met deze machtsfunctie door een knip te leggen rondom een volume van circa 1 m<sup>3</sup>/m en de metingen te benaderen door twee op elkaar aansluitende formules.

### 3.3.4 Variabiliteit in de gemeten frontnelheden

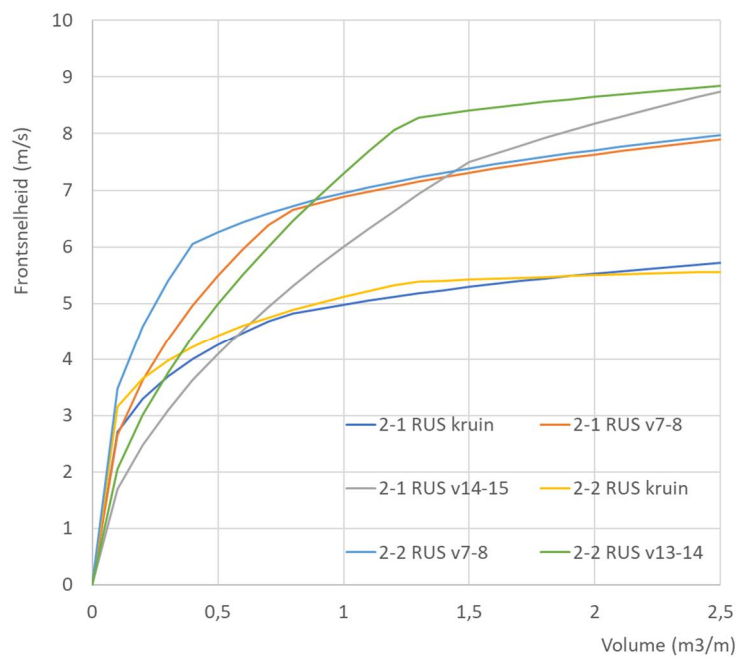
De metingen laten een variabiliteit in frontnelheid zien die afhankelijk is van toevalligheden bij het loslaten van het volume, het vallen van het water op de uitstroomconstructie en vervolgens de dynamiek van het over de kruin en het talud stromen van het volume water. Eenzelfde volume geeft een spreiding van de frontnelheid op één locatie langs het talud. Ook de ontwikkeling van de frontnelheid langs het talud gaat gepaard met toe- en afnames van de frontnelheid. Dit kan maar ten delen worden verklaard door de meetmethode van het tellen van het aantal beelden voor het overbruggen van één meter. De fitparameters zijn zodanig bepaald dat deze zo goed mogelijk het gemiddelde van de frontnelheid per volume en per locatie op het talud beschrijven. Of de fit-functie aan de hoge kant of aan de lage kant van de metingen zit blijkt slechts van beperkte invloed op de teruggerekende U<sub>c</sub>. Het verschil is naar verwachting enkele procenten (zie Bijlage B).

### 3.3.5 Resultaten frontnelheden

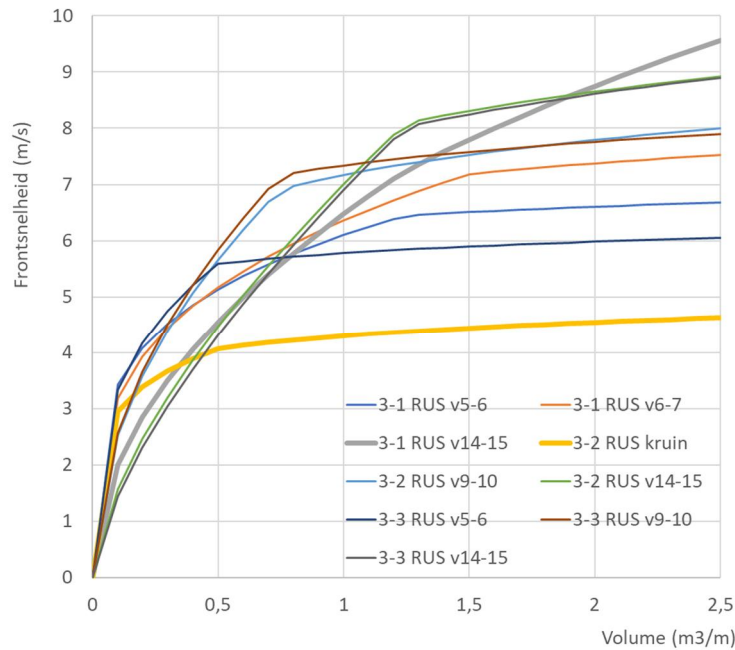
De metingen en grafieken van de fitfuncties en fitparameters worden gegeven in Bijlage C. Een voorbeeld van de gefitte relatie tussen frontnelheid, volume en locatie ten opzichte van de uitstroomopening wordt per locatie gegeven in Figuur 3.3, Figuur 3.4 en Figuur 3.5. De plaatsaanduiding op het talud van bijvoorbeeld v4-5 wil zeggen dat de metingen waarop de functie is gefit zijn uitgevoerd op het interval tussen 4 en 5 m van de uitstroomopening van de simulator. Bij de plaatsaanduiding kruin is gekeken naar de frontnelheid op een afstand van 2-3 en 3-4 m vanaf de uitstroomopening van de simulator. Fitfuncties zijn gemaakt voor plekken waar schade optrad en/ of waar de frontnelheid maximaal was. Het kwam voor dat de frontnelheid voor de grootste volumes lager op het talud het grootst was, maar dat voor een plek iets hoger op het talud de frontnelheid bij wat kleinere volumes juist groter was. Op voorhand is niet aan te geven welke plek dan maatgevend is, waardoor in deze gevallen meerdere fits zijn gebruikt in de analyse.



Figuur 3.3 Fit-functies frontsnelheid (m/s) tegen volume (m<sup>3</sup>/m) voor locatie 1 strook 1-1a, 1-1b en 1-2 voor verschillende plekken op het talud



Figuur 3.4 Fit-functies frontsnelheid (m/s) tegen volume (m<sup>3</sup>/m) voor locatie 2, strook 2-1 en 2-2 voor verschillende plekken op het talud



Figuur 3.5 Fit-functies frontnelheid (m/s) tegen volume (m<sup>3</sup>/m) voor locatie 3, strook 3-1, 3-2 en 3-3 voor verschillende plekken op het talud

De algemene trend is dat hogere volumes een hogere frontnelheid geven. Opgemerkt wordt dat voor wat lagere volumes bijvoorbeeld tussen 0,5 en 1 m<sup>3</sup>/m de frontnelheid halverwege het talud significant hoger kan zijn dan onderaan het talud. Voor grotere volumes is de snelheid onderaan het talud juist groter.

Opgemerkt wordt dat bij een golfhoogte van 0,5 m zelfs bij een waterstand vlak bij de kruin bij een golfoverslagdebiet van 60 l/s per m' er maar een paar volumes groter zijn dan 0,5 m<sup>3</sup>/m. Kleine volumes geven een lage frontnelheid en dragen nauwelijks bij aan erosie. De erosieve belasting bij een golfhoogte van 0,5 m is vele malen kleiner dan de erosieve belasting bij een golfhoogte van 1 m.

### 3.4 U<sub>c</sub> uit proeven Vechtdijk 2020-2021

Op basis van waarnemingen bij de grootschalige proeven in het winterseizoen 2020-2021 zijn de kritische stroomsnelheden U<sub>c</sub> van de grasbekleding voor zover mogelijk teruggerekend. In een enkel geval trad geen schade op, in enkele gevallen alleen het begin van schade en in drie gevallen falen van de grasbekleding. De waarnemingen zijn ontleend aan [1] en samengevat in Tabel 3.2. In deze tabel worden proefnamen gegeven in de vorm van bijvoorbeeld GO190\_1,0. Hiermee wordt bedoeld een golfoverslagproef met een debiet van 190 l/s per 'm bij een significante golfhoogte van 1,0 m. Let op dat dit ook betekent dat de lagere belastingen op dezelfde strook ook al zijn uitgevoerd (zie Tabel 3.1).



Tabel 3.2 Samenvatting momenten optreden schade en falen per teststrook

Strook	Moment tijdens proef bij begin schade	Moment tijdens proef bij falen grasbekleding
1-1a Buitentalud Berkum	3 uur GO190_1,0 vak 4 en 14	N.v.t.
1-2 Buitentalud Berkum	5 uur GO50_1,0 vak 5	1,5 uur GO190_1,0 vak 5
1-1b Buitentalud Berkum (WOS)	5 uur GO190_1,0 vak 16	N.v.t.
2-1 Buitentalud volkstuin	5 uur GO50_1,0 vak 8	2 uur GO100_1,0 vak 8
2-2 Binnentalud volkstuin	5 uur GO100_1,0 vak 2	N.v.t.
3-1 Hessenweg binnentalud (extra graverij na reguliere proef)	3,25 uur GO190_1,0 vak 6	N.v.t.
3-2 Hessenweg buitentalud	N.v.t.	N.v.t.
3-3 Hessenweg binnentalud (kort gras en graverij)	2,5 uur GO100_1,0 vak 5 en 6	1 uur GO190_1,0 vak 10

Begin van schade betekent het ontstaan van een kale plek en het begin van het afstropen van de zode. Dit is meer dan enkel slijtage, het wegspoelen van grond tussen pollen of rondom penwortelvegetatie. Bij begin van schade begint het wortelnetje dat de grond bij elkaar houdt af te stropen als gevolg van de overtrekkende volumes water.

Het falen van de grasbekleding treedt op als de toplaag doorbreekt. De toplaag blijkt, net als bij grasbekledingen op een substraat van klei, te bestaan uit twee lagen. Bovenop ligt de zode met een laagdikte van circa 0,1 m. Het wortelnet is hier zeer dicht. Bij het begin van schade ontstaat er een gaatje in deze zodelaag. Daarna stroopt de zodelaag af. De grond uit de zodelaag verdwijnt met verloop van tijd en het wortelnet van de zodelaag kan langs de randen blijven hangen. Deze wortelmassa is taai en sterk. Onder de zodelaag bevindt zich een laag waarin voldoende wortels aanwezig zijn om in combinatie met enige plakkracht tussen de zandkorrels een erosiebestendige laag te vormen. De mogelijkheid bestaat dat de erosiebestendige laag aan het oppervlak van de schade het gevolg is van interne slemp (zie hiervoor Paragraaf 3.8.1). Het oppervlak is relatief glad. Wortels die afgebroken zijn bij het lostrekken van de zodelaag hangen uit het oppervlak. Erosie van deze laag gaat relatief geleidelijk de diepte in tot dat op circa 0,3 à 0,4 m de dichtheid aan wortels in combinatie met plakkracht van de korrels ineens vermindert. Daaronder zijn nog maar weinig wortels en plakkracht en bevindt zich los zand dat makkelijk wegspoelt door golfoverslag. Tijdens de proeven vertaalt dit zich in het ineens meevoeren van veel zand uit de erosiekuil en het hiermee ineens veel sneller verdiepen van de kuil. Een en ander wordt geïllustreerd door middel van enkele foto's in Figuur 3.6. Hierin is aangegeven wat de toplaag is, de zode en het onderliggende kernmateriaal.



Figuur 3.6 Illustratie schade en doorbraak van de toplaag op de Vechtdijk, onderscheid tussen zode, toplaag en kernmateriaal (zode is onderdeel van de toplaag). Linksboven: toplaag doorgebroken; rechtsboven: schade; linksonder: toplaag doorgebroken; rechtsonder: toplaag doorgebroken

Te zien is dat het aantal wortels afneemt met toenemende diepte van de erosie. Met name bij de rechter twee foto's in de bovenstaande figuur is te zien dat na het afstropen van de zode nog veel wortels uit de resterende toplaag steken. Daaronder is te zien dat vlak bij de doorbraak van de toplaag, het aantal wortels dat uit de resterende toplaag steekt veel geringer is.

In het geval dat er geen falen van de grasbekleding was (doorbraak van de toplaag) is gekeken naar welke  $U_c$  in dat geval minimaal aanwezig moet zijn geweest. Er is dan berekend bij welke  $U_c$  de kritische waarde van  $D$  niet wordt bereikt, waarbij ten overvloede wordt opgemerkt dat dus ook hogere waarden van  $U_c$  verklarend kunnen zijn voor het niet falen.

In lijn met de bepaling van de  $U_c$  voor gras op klei in het kader van het WBI2017, is de  $U_c$  teruggerekend, gebruik makend van de frontsnelheid op de plek waar schade en of falen optrad. De plaats waar dat gebeurde blijkt niet altijd dezelfde plek waar ook de frontsnelheid het hoogste is. Naast de beperking van enkel de frontsnelheid als schatter van de erosieve belasting komt dit waarschijnlijk ook door variabiliteit van de sterkte over de beproefde strook grasbekleding. De plek die als eerste bezweek is als bepalend beschouwd voor het schatten van de  $U_c$  van de bekleding in de proefstrook.

### 3.4.1 Strook 1-1a Buitentalud Berkum

Er is geen falen van de grasbekleding opgetreden binnen de uitgevoerde proefduur, inclusief de volumes behorend bij de hydraulische metingen. Er is wel schade opgetreden ter plaatse van vak 4, bovenaan het talud en vak 14 en 15 onderaan het talud (Figuur 3.7).



Figuur 3.7 Schade vak 4 bij de kruin(links) en vak 14 en 15 onderaan het talud (rechts)

De verkleuring van het gras bij de asfaltweg komt doordat dit enige tijd voorafgaand aan de proef is afgedekt met grond om het hoogteverschil tussen het (nieuwe) asfalt op de kruin en de dijk te overbruggen. Deze aanaarding, die nog nauwelijks was begroeid, is bij de eerste golven weggespoeld. Het onderliggende gras was wel verkleurd, maar had nog sterkte.

Op basis van geen falen van de grasbekleding ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt berekend dat de  $U_c > 4,5 \text{ m/s}$  op de kruin en  $U_c > 6,4 \text{ m/s}$  op het talud moet zijn.

Indien schade optreedt rondom  $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , dan wordt een  $U_c$  berekend van  $4,9 \text{ m/s}$  op de kruin en  $6,5$  à  $7 \text{ m/s}$  op het talud. Hierbij wordt opgemerkt dat het criterium van het optreden van schade een relatief onbetrouwbare schatter is van  $D$ .

De mogelijkheid bestaat dat het hoogteverschil tussen het asfalt en de grasbekleding lokaal tot een hogere belasting op de grasbekleding leidt. Tijdens de proeven is gezien dat de stroming soms loslaat van het asfalt en een klein stukje verder op het gras weer aanligt aan de bekleding (Figuur 3.8). Dit kan lokaal tot hogere drukgradiënten leiden en daarmee een hogere erosieve belasting. Overigens zal ook zonder loslating van de stroming, de ombuiging van de stroomrichting kunnen leiden tot een lokaal hogere belasting.





Figuur 3.8 Screenshots van film van golfoverslagvolume die over de rand van het asfalt stroomt. Bij grote volumes liet de stroming los (lucht onder de stroming langs de asfaltrand)

In de cumulatieve overbelastingmethode wordt de negatieve invloed van overgangen en objecten in rekening gebracht door de factoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$  (zie Paragraaf 3.2). Onbekend is welke alfa-factoren precies van toepassing zijn op deze overgang. Voor een overgang van een relatief glad oppervlak naar een relatief ruw oppervlak wordt vanuit theorie uitgegaan van in het slechtste geval  $\alpha_M = 1,8$  (-) [4]. Bij het terugrekenen van eerdere (golfoploop)proeven blijkt de factor voor de overgang van asfalt naar gras ook veel lager te kunnen zijn, bijvoorbeeld orde 1,2 [6]. Voor  $\alpha_S$  wordt, bij een netjes op de overgang aansluitende grasbekleding uitgegaan van 0,9 (-). Om een beeld te krijgen van mogelijke  $U_c$ , bij de overgang van asfalt naar gras is voor enkele combinaties van de factoren uitgerekend hoeveel de  $U_c$  is die de waarneming ondersteunt: geen falen en schade in vak 4 (Tabel 3.3). Hierbij is uitgegaan van een maximale invloed en geen invloed en middelmatige invloed. Uiteraard geldt dat hoe groter de invloed, hoe hoger de teruggerekende  $U_c$ . Een lage inschatting van de invloed leidt dus tot een lage inschatting van de  $U_c$ .

Tabel 3.3 Gevoeligheid teruggerekende  $U_c$  (m/s) op de kruin op de overgang van asfalt naar gras voor combinaties van invloedsfactoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$

Scenario	$\alpha_M$ (-)	$\alpha_S$ (-)	D (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$U_c$ (m/s)
Ia (geen invloed)	1	1	1000 schade	4,9
Ib (geen invloed)	1	1	7000 (geen) falen	>4,5
IIa	1,2	0,9	1000 schade	5,7
IIb	1,2	0,9	7000 (geen) falen	>5,2
IIIa	1,2	1	1000 schade	5,4
IIIb	1,2	1	7000 (geen) falen	>5,0
IVa (maximale invloed)	1,8	0,9	1000 schade	7,1
IVb (maximale invloed)	1,8	0,9	7000 (geen) falen	>6,6



De berekende spreiding in teruggerekende  $U_c$  is aanzienlijk, van 4,5 tot 7 m/s. Een ondergrens wordt gevormd door de aanname dat er nauwelijks invloed is van de overgang en dat er geen falen is opgetreden. De  $U_c$  op de kruin moet daarmee minimaal 4,5 m/s zijn geweest. Bij enige invloed van de overgang zal de  $U_c$  minimaal 5,0 m/s zijn geweest op basis van niet falen en orde 5,5 m/s op basis van het optreden van schade.

Deze schattingen voor de kruin zijn net iets lager dan op het talud, maar ze hoeven niet in tegenspraak te zijn. Als de waarden van  $U_c$  voor het talud ook gelden voor de kruin, dan kan dit worden verklaard door een relatief grote invloed van de overgang op het ontstaan van schade. Het ligt echter voor de hand dat het gaat om een combinatie van factoren, enerzijds de beschadiging door het afdekken van de zode door de aanaarding van het asfalt met daarbij opgeteld een zekere (onbepaalde) negatieve invloed van de overgang.

### 3.4.2 Strook 1-2 Buitentalud Berkum

Er is schade gevolgd door falen van de grasbekleding opgetreden (Figuur 3.9). Na falen van de bekleding is de proef met 190 l/s per m bij een golfhoogte van 1 m nog een half uur doorgezet, leidend tot een flink gat in de dijk.



Figuur 3.9 Schade vak 5 bij de kruin (1), falen (2) en resultaat na extra 0,5 uur GO190\_1,0 ten opzichte van falen (3)

Voor de gedetailleerde beschrijving van de proefstrook, met beeldmateriaal, wordt verwezen naar [1]. Onderaan het talud waren molgangen aanwezig. De uiteindelijke plek van falen bovenaan het talud kwam door de uitbreiding van een klein gaatje in de toplaag. Onbekend is of dit ook een mollengang was, andere dierlijke graverij, of de voormalige plek van een paaltje is geweest (het gaatje leek vrij verticaal naar beneden te gaan). Het effect van mollen en andere kleine gangetjes wordt niet apart meegenomen bij de bepaling van de  $U_c$ . Dit soort kleine schades horen bij taluds en zijn met normaal beheer en onderhoud niet te voorkomen.

Ook voor deze strook geldt dat het hoogteverschil tussen het asfalt en de dijk is overbrugd met een aanaarding. Dat is de oorzaak van de verkleuring van het gras langs het asfalt. De aanaarding is met de eerste golven weggespoeld.

Op basis van falen van de grasbekleding ( $D=7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt een  $U_c$  berekend van 5,1 m/s. Deze  $U_c$  geeft op het moment van schade  $D=730 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , van gelijke orde van grote als het criterium voor eerste schade van  $1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

De hoogste frontsnelheden treden op onderaan het talud. Op basis van niet falen van de bekleding ( $D < 7000$ ) is de minimale teruggerekende  $U_c$  hier 7,1 m/s.

Het ontstaan van schade trad in dit geval wat verder van de rand van het asfalt op dan bij strook 1-1a, waardoor de invloed van deze overgang waarschijnlijk minder heeft gespeeld dan bij strook 1-1a. Het kan wel zijn dat de aanaarding heeft geleid tot enige verzwakking en dat de overgang heeft geleid tot enige toename van de erosieve belasting. Indien hiermee rekening wordt gehouden dan leidt dit tot een iets hogere verwachting van de  $U_c$  (Tabel 3.4).

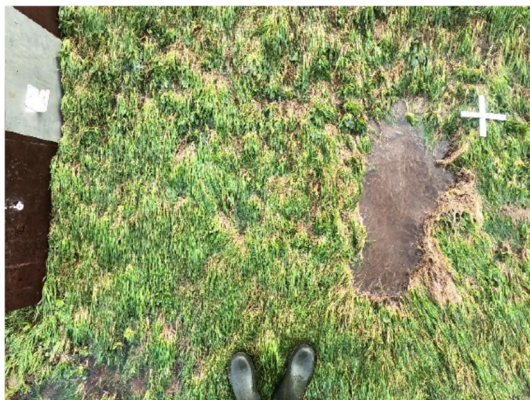
Tabel 3.4 Gevoeligheid teruggerekende  $U_c$  (m/s) op de kruin op de overgang van asfalt naar gras voor combinaties van invloedsfactoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$

Scenario	$\alpha_M$ (-)	$\alpha_S$ (-)	D ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )	$U_c$ (m/s)
I (geen invloed)	1	1	7000 falen	5,1
II	1,2	1	7000 falen	5,6
III (maximale invloed)	1,8	1	7000 falen	7,0

De sterkte op de kruin is lager dan de sterkte op het talud. Ook hier geldt dat indien de  $U_c$  van het talud (meer dan 7 m/s) ook op de kruin zou gelden, dit alleen zou kunnen door een zeer grote invloed van de overgang op de belasting. Dit is onwaarschijnlijk. Het ligt meer voor de hand dat ofwel door de aanaarding, of door andere factoren zoals een iets andere vegetatie, op de kruin sprake is van een significant zwakkere grasbekleding.

### 3.4.3 Strook 1-1b Buitentalud Berkum (WOS)

De proef is uitgevoerd met de golfoverslagsimulator (WOS), in tegenstelling tot alle andere proeven die zijn uitgevoerd met de golfploopsimulator. Er is geen falen van de grasbekleding opgetreden binnen de uitgevoerde proefduur, inclusief de volumes behorend bij de hydraulische metingen. Er is wel schade aan grasbekleding opgetreden aan het einde van het proefprogramma in vak 16, onderaan het talud (Figuur 3.10).



Figuur 3.10 Schade vak 16 aan het einde van het proefprogramma

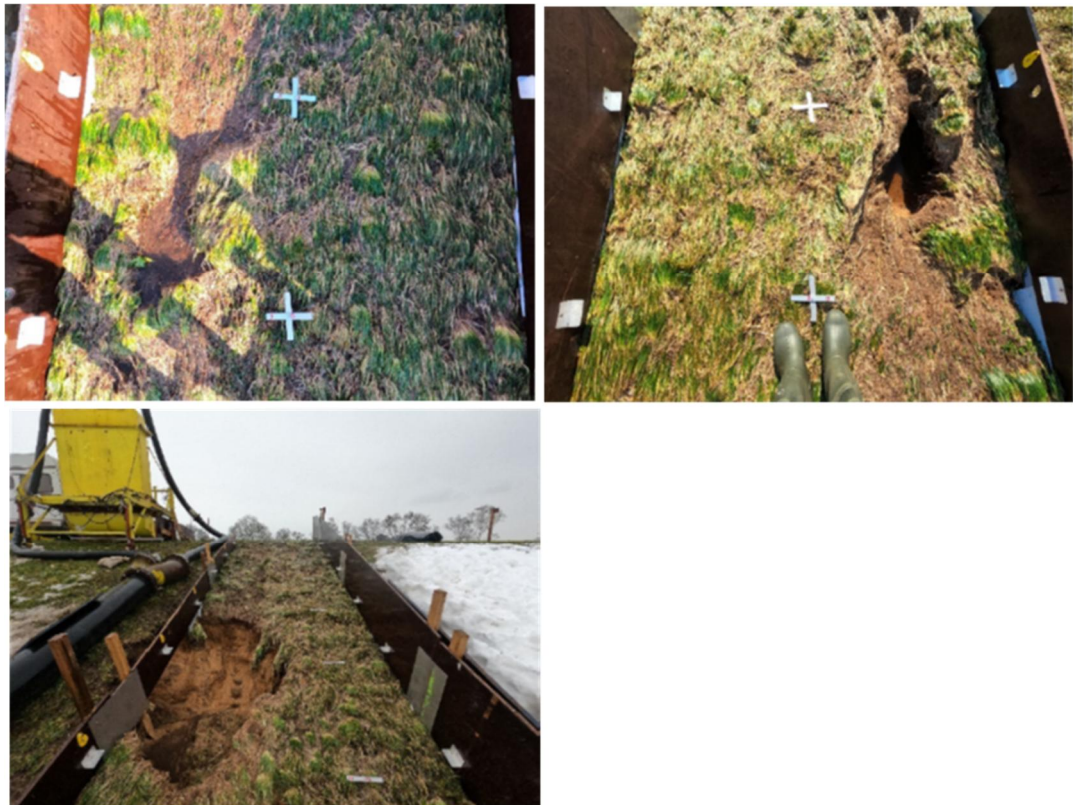
Voor de gedetailleerde beschrijving van de proefstrook, met beeldmateriaal, wordt verwezen naar [1]. Ook voor deze strook geldt dat er recent asfalt op de kruin is gelegd en dat het hoogteverschil tussen het asfalt en de dijk is overbrugd met een aanaarding. De aanaarding is met de eerste golven weggespoeld.

Op basis van niet falen van de grasbekleding ( $D=7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt een  $U_c$  berekend van minimaal 5,2 m/s op het talud. Uitgaande van schade aan het einde van de proef ( $D=1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt een  $U_c$  van 5,6 m/s berekend.

Voor de kruin wordt op basis van geen falen een  $U_c$  berekend van minimaal 3,9 m/s.

#### 3.4.4 Strook 2-1 Buitentalud

Er is schade gevolgd door falen van de grasbekleding opgetreden (Figuur 3.11). Na falen van de bekleding is de proef met 100 l/s per m bij een golfhoogte van 1 m nog een half uur doorgezet, leidend tot een flink gat in de dijk.



Figuur 3.11 Schade vak 8 (links), falen (rechts), respectievelijk na 5 uur GO50\_1,0 en 2 uur GO100\_1,0. Na falen is de proef nog 0,5 uur doorgezet leidend tot het gat op de foto onderaan

Voor de gedetailleerde beschrijving van de proefstrook, met beeldmateriaal, wordt verwezen naar [1]. Ook in dit vak, net als op strook 1-2, waren onderaan het talud mollengangen aanwezig. Aan de bovenzijde van het zuidelijk georiënteerde talud was de bedekking minder hoog dan onderaan het talud. Op de kruin was een pad ontstaan (kale plekken) door veelvuldig betreden. Het effect van deze beschadigingen door mollen en of betreden wordt meegenomen bij de bepaling van de  $U_c$ . Dit soort kleine schades horen bij taluds en zijn met normaal beheer en onderhoud niet of nauwelijks te voorkomen.

Op basis van falen van de grasbekleding ( $D=7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt een  $U_c$  berekend van 5,6 m/s. Deze  $U_c$  geeft op het moment van schade  $D=2380 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Dit is aan de hoge kant ten opzichte



van het criterium voor eerste schade van  $1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , echter het is niet ongewoon dat de D bij het criterium voor schade afwijkt van  $1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

Opgemerkt wordt dat de belasting op de plek waar de schade optrad tevens de plek is met de hoogste frontsnelheden.

Voor de kruin, waar de frontsnelheid aanzienlijk lager is, wordt op basis van niet falen een minimale  $U_c$  berekend van  $4,0 \text{ m/s}$ .

### 3.4.5 Strook 2-2 Binnentalud

Er is geen falen van de grasbekleding opgetreden binnen de proefduur en de hydraulische metingen. Er is schade van de grasbekleding opgetreden ter plaatse van de kruin na 5 uur GO100\_1,0 (golfoverslagproef met  $100 \text{ l/s}$  per 'm bij een gesimuleerde golfhoogte van  $1,0 \text{ m}$ ). De proef is vervolgens doorgegaan tot 2,5 uur GO190\_1,0, waarbij de schade groter en dieper is geworden (Figuur 3.12).

Vanwege de vrees voor snelle doorgaande schade is deze afgedekt om de rest van het talud verder te kunnen beproeven. Na afloop van het reguliere programma is de afdekking van de schade verwijderd en is alsnog 1,25 uur van het GO190\_1,0 programma uitgevoerd. Hierbij is de schade aan de kruin groter geworden, maar er trad geen falen op.

De belasting op het talud heeft bestaan uit het reguliere programma plus 1,25 uur GO190\_1,0 (en de volumes voor de hydraulische metingen). De kruin is belast met het reguliere programma min 1,25 uur GO190\_1,0.



Figuur 3.12 Schade vak 2 (links) na 5 uur GO100\_1,0 en na 3,75 uur GO190\_1,0

Voor de gedetailleerde beschrijving van de proefstrook, met beeldmateriaal, wordt verwezen naar [1]. De bedekking op het noordelijk georiënteerde talud was relatief egaal. Het verschil tussen boven en onderzijde van het talud, zoals op strook 2-1 was hier niet aanwezig. Wel was er op (dezelfde) kruin hetzelfde pad ontstaan door veelvuldig betreden.

Op basis van niet falen van de grasbekleding op het talud ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt een  $U_c$  berekend van minimaal  $7,4 \text{ m/s}$ . Dit geldt voor de onderzijde van het talud waar de frontsnelheden het hoogst waren.

Uitgaande van niet falen op de kruin van de dijk ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt voor de kruin een  $U_c$  berekend van minimaal  $4,7 \text{ m/s}$ . Bij deze  $U_c$  wordt op het moment van schade aan de kruin een D berekend van  $1730 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , wat redelijk in lijn is met het criterium van 1000 voor begin van schade. Omgekeerd levert een criterium van  $D=1000$  voor de kruin een bijbehorende  $U_c$  van  $4,8 \text{ m/s}$ . Dit is in lijn met het resultaat van de proef op strook 2-1 op dezelfde kruin, met hetzelfde pad door veelvuldig betreden, waarbij is vastgesteld dat de  $U_c$  minimaal  $4,0 \text{ m/s}$  moet zijn geweest.



### 3.4.6 Strook 3-1 Hessenweg Binnentalud

Er is geen falen van de grasbekleding opgetreden binnen de proefduur en de uitvoering van de hydraulische metingen. Er is wel schade van de grasbekleding opgetreden ter plaatse van vak 6 na 3,25 uur GO190\_1,0 (Figuur 3.13).



Figuur 3.13 Schade vak 6 (links) na 3,25 uur GO190\_1,0 en na 5 uur GO190\_1,0 (rechts)

Voor de gedetailleerde beschrijving van de proefstrook, met beeldmateriaal, wordt verwezen naar [1]. De bedekking op het noordelijke talud was egaal. Op de kruin zijn grasbetonstenen aanwezig, echter deze zijn volledig verborgen onder de grasbekleding. Opgemerkt wordt dat het gras hier relatief lang was ten opzichte van de eerdere proefstroken (bij proefstrook 3-3 is hetzelfde talud juist heel kort gemaaid).

Op basis van niet falen van de grasbekleding op het talud ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt een  $U_c$  berekend van minimaal 5,8 à 6,6 m/s, afhankelijk van de plek op het talud. Aan de onderzijde van het talud was de belasting hoger dan aan de bovenzijde, waardoor de bewezen sterkte onderaan wat hoger is dan bovenaan. Dit wil overigens niet zeggen dat de werkelijk aanwezige sterkte onderaan het talud ook echt hoger is.

Op het moment van eerste schade bij  $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  na 3,25 uur GO190\_1,0 wordt voor vak 6 een  $U_c$  berekend van 6,5 m/s.

### 3.4.7 Strook 3-1 Hessenweg binnentalud – aanvullend graverij

Na afloop van deze reguliere proef is de schade in vak 6 afgedekt om verdere schadeontwikkeling te voorkomen.

Vervolgens is graverij aangebracht in vakken 8, 10 en 12, zoals beschreven in [1]. De graverij simuleert de typische schade door konijnen, vossen en een hond. In vak 8 en 12 zijn zowel een konijnen- als een vossenhol aangebracht met een diameter van respectievelijk 7,5 cm en 15 cm naar inzicht van de beheerder. Deze gaten lopen iets naar beneden ten opzichte van horizontaal door de toplaag tot ruim één meter in de zandkern. In vak 10 is een typische hondengraafplek aangebracht van 60x35x24 cm. Deze heeft dus een aanzienlijk groter oppervlak, maar gaat niet door de toplaag heen (Figuur 3.14).

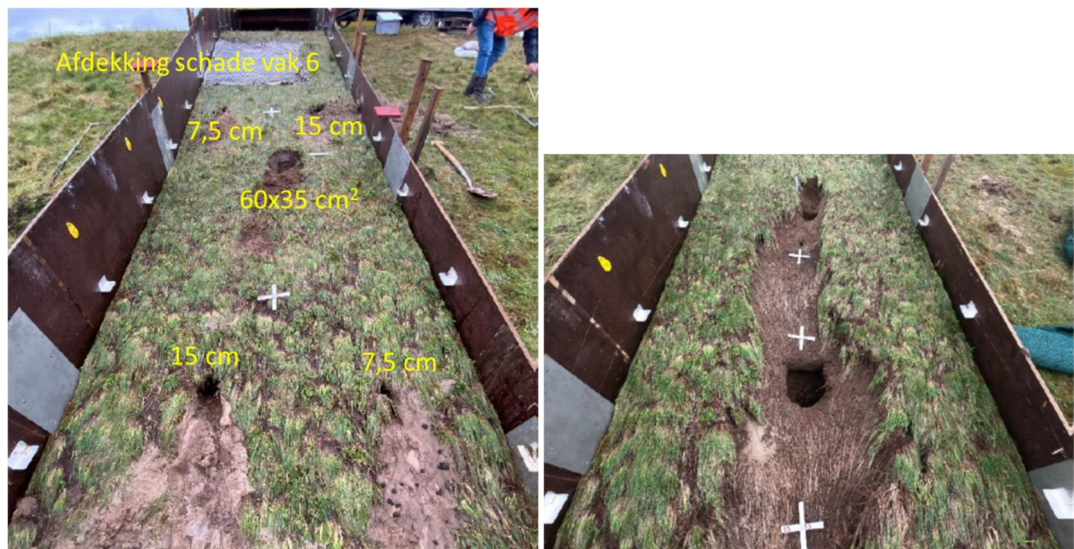
Hierop zijn de volgende proeven uitgevoerd:

- 5 uur GO1\_0,5.
- 5 uur GO60\_0,5 en
- 1,5 uur GO190\_1,0.

Na 5 uur GO60\_0,5 is de graafschade van de 'hond' 20 cm langer geworden, marginaal breder en slechts 1 cm dieper. De schades door 'konijn' en 'vos' zijn niet veranderd.

Bij het uitvoeren van de proef GO190\_1,0 is de schade als gevolg van 'hond' snel langer geworden. In 0,5 uur naar circa 5,25 m en na 1,5 uur bijna 6 m. De diepte bleef echter beperkt tot enkele centimeters meer dan de aanvangsdiepte van 25 cm. Er was dus geen sprake van falen van de toplaag.

Hierop zijn in de schade als gevolg van de 'hond' twee gaten door de toplaag heen gegraven, tot een diepte van 45 cm. In vak 10 een gat van 15x15x45 cm en in vak 12 een gat van 30x30x45 cm. Na een half uur GO60\_0,5 is hieruit zand weggespoeld, waardoor deze gaten vooral dieper zijn geworden (63 cm voor het grotere gat; zie Figuur 3.14).



Figuur 3.14 Aangebrachte graafschade konijn, vos en hond naar inzicht beheerder en afgedekte schade vak 6 (links) en eindschade (rechts)

De graverij laat zien dat deze in deze vorm niet direct leidt tot falen van de toplaag. Relatief kleine gaten door de toplaag heen en grotere gaten die niet door de toplaag gaan tasten in dit geval de sterkte van de grasbekleding in beperkte mate aan.

Het terugrekenen van de  $U_c$  is in dit geval niet voor de hand liggend. Als de schades direct aan het begin van de proef waren aangebracht dan had dat waarschijnlijk tot een ander resultaat geleid. Het meenemen van de hele belasting van de reguliere proef met daarbij de aanvullende proef bij het terugrekenen van de  $U_c$  leidt waarschijnlijk tot een overschatting. Een conservatieve schatting van de  $U_c$ , inclusief het effect van deze schades, is om de aanvullende proef als een verse proef te zien. Indien enkel de drie proeven worden meegenomen tot en met de 1,5 uur GO190\_1,0, dan leidt het niet falen van de toplaag ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) tot een minimaal aanwezig  $U_c$  van 5,4 m/s. Dit is uiteraard wat minder dan het resultaat van de reguliere proef (minimaal 5,8 à 6,6 m/s), maar de invloed van deze schades was in dit geval beperkt.

#### 3.4.8 Strook 3-2 Hessenweg buitentalud

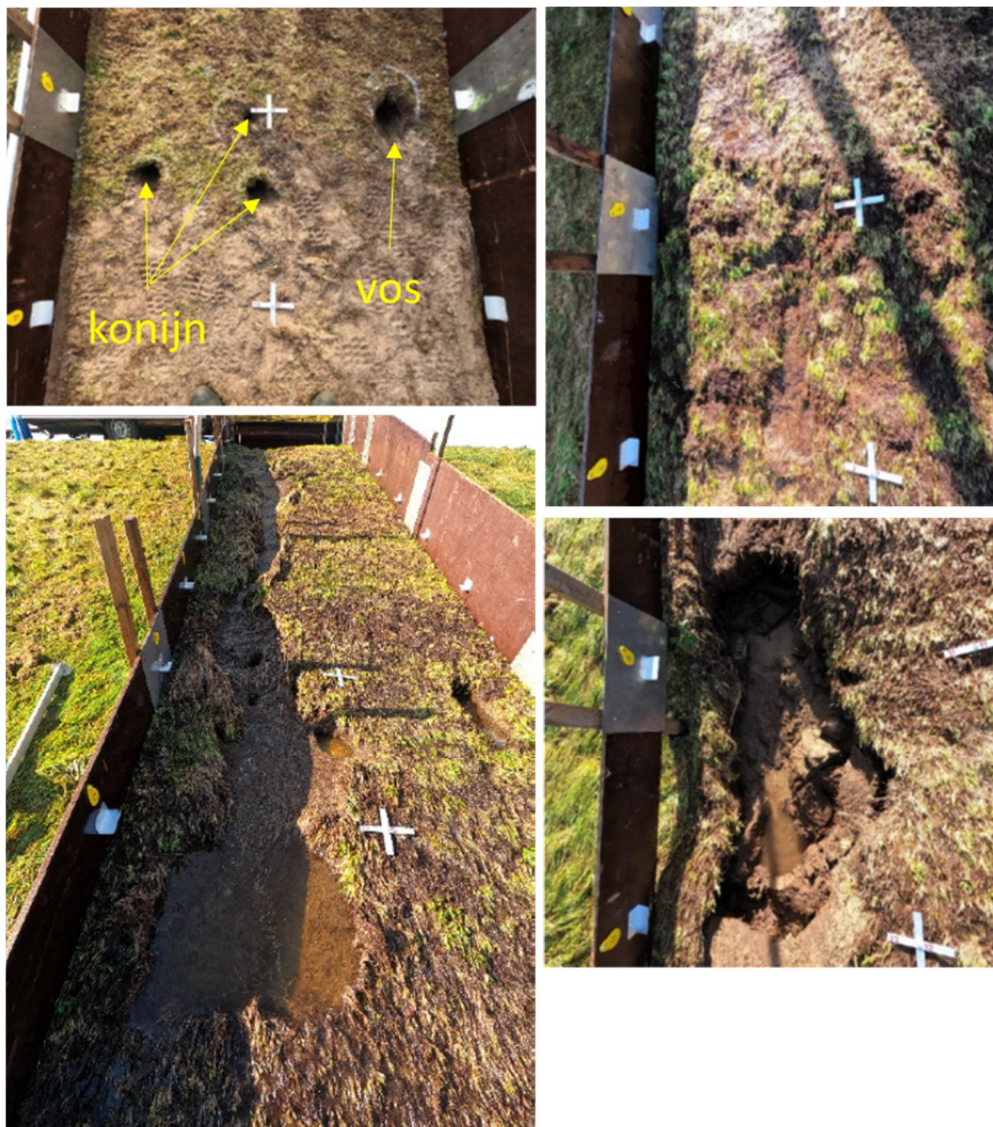
Er is geen falen en geen schade van de grasbekleding opgetreden. Voor de gedetailleerde beschrijving van de proefstrook, met beeldmateriaal, wordt verwezen naar [1]. De bedekking op het zuidelijk georiënteerde talud was relatief egaal. Her en der waren wat kale plekjes.



Op basis van niet falen van de grasbekleding op het talud ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt een  $U_c$  berekend van minimaal 6,9 à 7,3 m/s, afhankelijk van de plek op het talud. Aan de onderzijde van het talud was de belasting hoger dan aan de bovenzijde, waardoor de bewezen sterkte onderaan hoger is dan bovenaan. Op de kruin waren de frontsnelheden aanzienlijk lager, waardoor enkel is aangetoond dat de  $U_c$  hier minimaal 4,0 m/s was.

#### 3.4.9 Strook 3-3 Hessenweg binnentalud aanvullend kort gras en graverij

Er is schade gevolgd door falen van de grasbekleding opgetreden (Figuur 3.15). Voorafgaand aan de proef is het gras zo kort mogelijk gemaaid. Dit kwam neer op een geschatte representatieve lengte van 3 cm, waarbij af en toe kale plekken ontstonden door wegmaaien van al het bovengrondse materiaal. In de proefstrook zijn in vak 11 gaten aangebracht met een lengte van 1 m en afmetingen van 25x15 cm, 20x20 cm en 8x8 cm (konijnen). Daarnaast is ook een vosgraverij gesimuleerd met een afmeting van 45x20 cm. Alle holen liepen ten opzichte van horizontaal iets naar beneden door de toplaag tot ruim één meter in de zandkern.



Figuur 3.15 Aangebrachte schade vak 11 (linksboven), eerste schade vak 5 na 2,5 uur GO100\_1,0 (rechtsboven), 0,25 uur GO190\_1,0 (linksonder) en falen na 1 uur GO190\_1,0 in vak 10 (rechtsonder)

Voor de gedetailleerde beschrijving van de proefstrook, met beeldmateriaal, wordt verder verwezen naar [1].

Wederom blijkt de relatieve ongevoeligheid voor schade aan de bekleding. De schades in deze vorm en omvang leiden wel tot het falen van de bekleding, maar de verzwakking valt relatief mee. Zeker de proeven bij een golfhoogte van 0,5 m lijken nauwelijks vat te hebben op de aangebrachte schades.

Uitgaande van falen van de grasbekleding na 1 uur GO190\_1,0 in vak 10, wordt een  $U_c$  berekend van 6,8 m/s. Dit was tevens de plek met de hoogste frontsnelheden. De bewezen sterkte in vak 5 (plek van eerste schade) op het moment van falen was minimaal 5,5 m/s en onderaan het talud 6,2 m/s, wat in lijn is met 6,8 m/s op basis van falen.

Gegeven een  $U_c$  van 6,8 m/s, zoals volgt uit falen in vak 10, wordt met de lokale frontsnelheden in vak 5, de plek met de eerste schade, wordt een  $D$  berekend van  $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Dit is veel lager dan circa  $1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$  die wordt gegeven voor 'eerste schade'. Als wordt uitgegaan van het criterium van  $D=1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , na 2,5 uur GO100\_1,0 in vak 5, dan wordt een  $U_c$  berekend van 5,6 m/s. Dit is aanmerkelijk lager dan 6,8 m/s op basis van falen in vak 10. Hieruit blijkt een zekere variabiliteit van de erosiebestendigheid binnen een proefstrook.

### 3.4.10 Samenvatting teruggerekende $U_c$ 's

De teruggerekende  $U_c$  zijn samengevat in Tabel 3.5. Er is per strook onderscheid gemaakt naar locatie en naar het criterium (falen/ geen falen/ schade).

Tabel 3.5 Samenvatting teruggerekende  $U_c$

Strook	Plek	Criterium	$U_c$ (m/s)
1-1a Buitentalud Berkum	Kruin	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>4,5
	Kruin	schade ( $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	4,9
	Talud	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	> 6,4
	Talud	schade ( $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	6,5 à 7
1-2 Buitentalud Berkum	Kruin	falen ( $D = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	5,1
	Talud	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>7,1
1-1b Buitentalud Berkum (WOS)	Kruin	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>3,9
	Talud	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>5,2
	Talud	schade ( $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	5,6
2-1 Buitentalud volkstuin	Kruin	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>4,0
	Talud	falen ( $D = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	5,6
2-2 Binnentalud volkstuin	Kruin	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>4,7
	Kruin	schade ( $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	4,8
	Talud	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>7,4
3-1 Hessenweg binnentalud	Talud	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>5,8 à
	Talud	schade ( $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	6,6 6,5
3-1 Hessenweg binnentalud – graverij	Talud	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>5,4
3-2 Hessenweg buitentalud	Kruin	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>4,0
	Talud	geen falen ( $D < 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	>6,9 à 7,3
3-3 Hessenweg binnentalud - kort gras en graverij	Talud vak 10	falen ( $D = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	6,8
	Talud vak 5	schade ( $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )	5,6



### 3.5 $U_c$ uit proeven Vechtdijk 2010

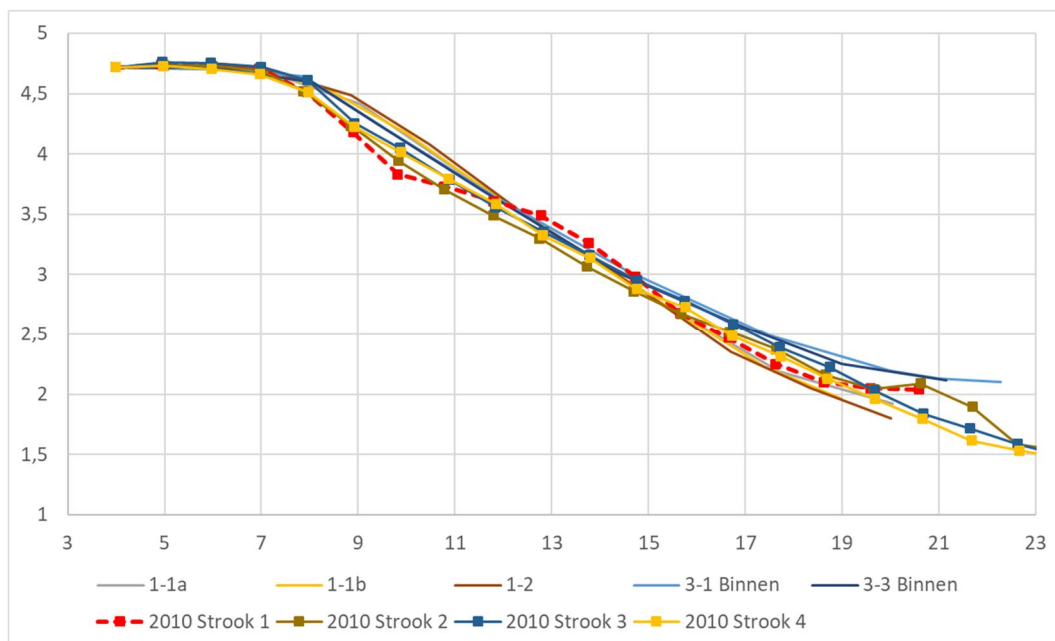
In 2010 zijn golfoverslagproeven uitgevoerd op de Vechtdijk, traject 9-1, dijkpaal 21.2 (nabij clubgebouw 't Kraaiennest van de waterscouting Zwolle). Er zijn vier stroken beproefd, één op het buitentalud, zuidelijk georiënteerd, en drie op het binnentalud, noordelijk georiënteerd. De proeven zijn destijds uitgevoerd in het kader van het WBI2017 programma, destijds nog SBW geheten. De proeven zijn destijds uitgevoerd met de golfoverslagsimulator (WOS).

De proeven zijn in het kader van onderhavig project beschreven in [5]. In dit rapport staan de verwijzingen naar de rapporten uit 2010 waarin de proef in meer detail is beschreven. De proefbeschrijving in [5] geeft uiteindelijk een voor deze locatie vastgestelde  $U_c$  van 3,5 m/s. Deze is overgenomen uit [6], waarin voor het eerst rekening is gehouden met de lokale frontsnelheid op het talud ter plaatse van de optredende schade en falen van de grasbekleding.

Ten opzichte van de recent uitgevoerde proeven op de Vechtdijk is 3,5 m/s aan de lage kant. Daarom is gekeken naar de verschillen en overeenkomsten tussen de proeflocatie van destijds en die van afgelopen winterseizoen.

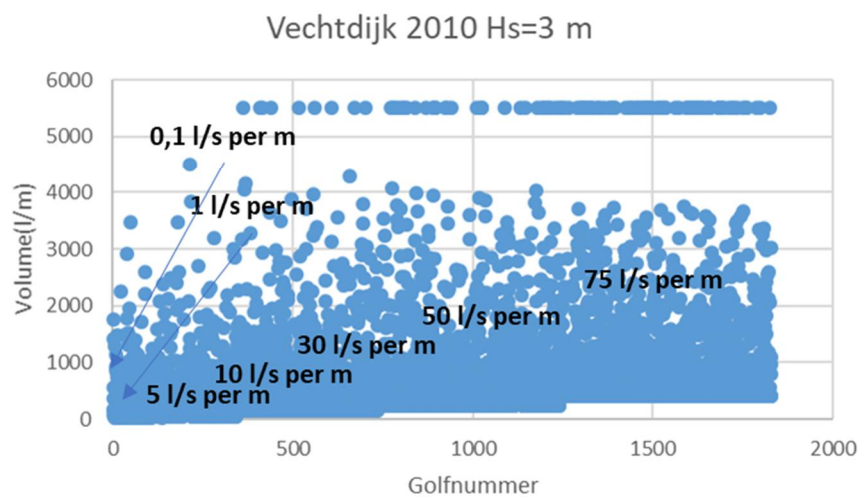
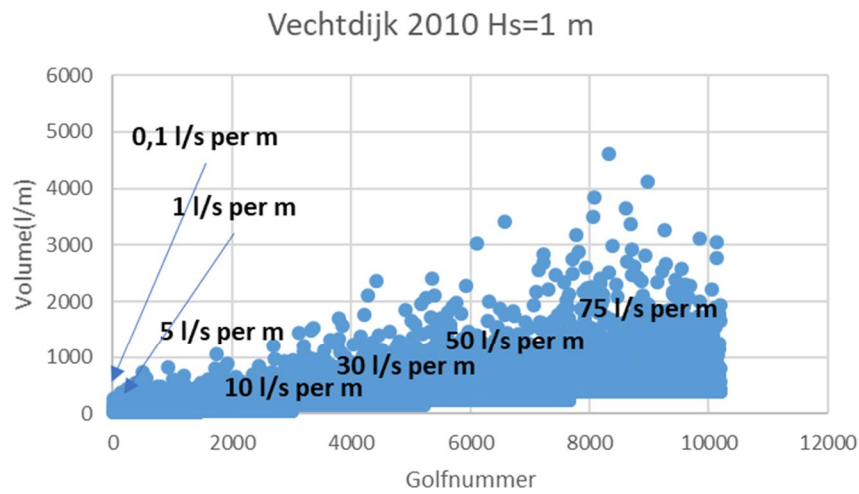
Van de vier proefstroken is er één uitgevoerd op het buitentalud, ter plaatse van een wegovertgang uitgevoerd in doorgroeistenen. De gesimuleerde golfhoogte was met 2 m aanzienlijk hoger dan bij de recente proeven. Dit betekent dat er veel minder kleine golven over het talud stroomden ten opzichte van grote golven. Falen trad op ter plaatse van de vrij scherpe overgang tussen het boventalud (1:2,8) en de wegovertgang. De stroming kreeg vat op de rand van de grasbetonstenen op deze overgang en de grotere volumes sloegen de stenen vervolgens uit de bekleding. De grasbekleding zelf faalde niet.

De drie andere proeven zijn uitgevoerd op het binnentalud. Het talud was vrij hol. Het bovenste taluddeel was in de orde van 1:3 tot 1:3,5, onderaan werd dat langzaam flauwer tot 1:6 aan toe waarna het overging in achterland. De gemiddelde taludhelling was circa 1:4,8. Deze geometrie is op hoofdlijn vergelijkbaar met die van de recente proeven, echter het taluddeel bovenaan bij de kruin is wat steiler (Figuur 3.16). Het profiel voor strook 1 (rood) is afwijkend in verband met de wegovertgang.

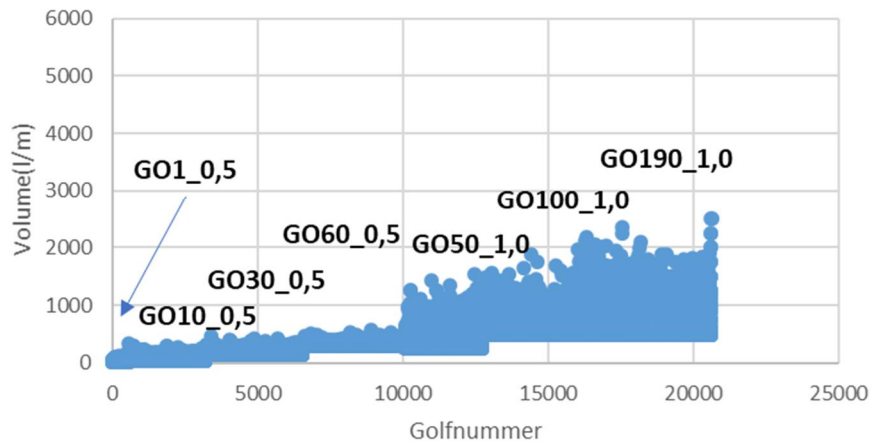


Figuur 3.16 Vergelijking taluds Vechtdijk 2010 (met marker) en recent beproefde taluds (zonder marker)

De proeven op het binnentalud zijn uitgevoerd met stormcondities van 6 uur bij een gesimuleerde golfhoogte van 1, 2 en 3 m. Hierbij is het golfoverslagdebiet telkens opgevoerd van 0,1-1-5-10-30-50-75 l/s per m'. De bijbehorende volumes (liter per 'm) voor een golfhoogte van 1 m en 3 m zijn uitgezet in Figuur 3.17. Als vergelijking zijn de volumes van de afgelopen proeven op de Vechtdijk hier onder geplaatst. In deze figuur is elk punt een golfoverslagvolume.



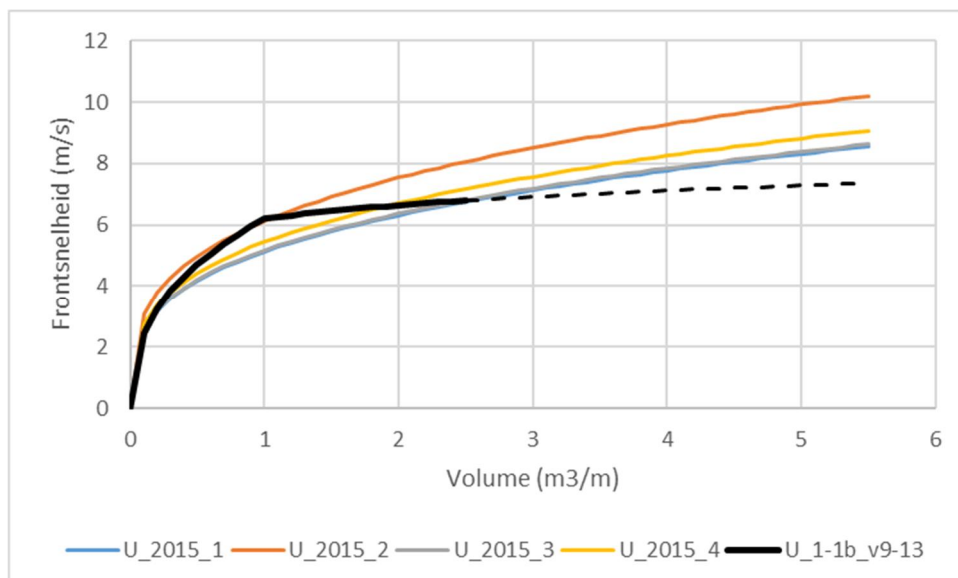
### Vechtdijk 2021 Hs=0,5 en 1 m



Figuur 3.17 Golfvolumes (l/m) als belasting op de Vechtdijk in 2010 voor een golfhoogte van 1 m en 3 m (boven en midden) en de volumes van het proefprogramma op de Vechtdijk 2021

Te zien is dat de belasting bij de 2010 proeven veel intensiever is geweest. De totale hoeveelheid water per m<sup>1</sup> was kleiner (maximaal debiet 75 l/s per m), maar de individuele volumes waren veel groter dan bij de recent uitgevoerde proeven. De inzichten rondom de verdeling van de overslagvolumes zijn gewijzigd [21]. Vergelijken we de 50 l/s per m proef bij een golfhoogte van 1 m, dan zien we bij de 2010 proef maximale volumes van ruim 3000 l/m, bij de recent uitgevoerde proeven was dat maximaal 2000 l/m.

De frontsnelheden zijn destijds gemeten door het opvolgend aanslaan van instrumenten die op het talud zijn geplaatst door een overslaande golf. De inzichten hieruit zijn in 2015 gebruikt voor de kalibratie van de ruwheidsfactor in een model om de ontwikkeling van de frontsnelheid op het talud te berekenen, afhankelijk van de beginsnelheid, laagdikte en taludhelling en lengte [6]. De resulterende relatie tussen frontsnelheid en volume voor de vier stroken uit 2010 is uitgezet tegen de fit in het kader van de recente proeven, strook 1-1b (WOS) voor een afstand van 9 tot 13 m van de uitstroomopening, daar waar de frontsnelheden het hoogst waren. De fit is uitgevoerd op volumes tot 2,5 m<sup>3</sup>/m, daarboven is de lijn gestippeld doorgezet (hier waren geen meetdata beschikbaar).



Figuur 3.18 Relaties frontsnelheid tegen volume voor de vier stroken van de proeven uit 2010 (U\_2010) ) en die van de recente proef met de golfoverslagsimulator (U\_1-1b)

De destijds gehanteerde frontsnelheden voor het bepalen van  $U_c$  komen redelijk overeen met de recente fit voor volumes tot  $2,5 \text{ m}^3/\text{m}$ . De relaties die destijds zijn gevonden zijn het resultaat van een enkele machtsfunctie. De mogelijkheid bestaat dat indien er destijds ook gekozen zou zijn voor het opknippen van de data, de relaties meer overeen zouden komen. Verwacht wordt echter dat dit niet zal leiden tot grote afwijkingen in  $U_c$ .

De destijds afgegeven  $U_c$  van  $3,5 \text{ m/s}$  voor deze locatie in het algemeen is in het kader van deze studie uitgewerkt naar een  $U_c$  per strook. Met behulp van de destijds afgeleide relaties tussen volume en frontsnelheid (Figuur 3.18) is per strook de  $U_c$  teruggerekend, leidend tot de volgende resultaten:

Strook 1 Hs=2 m	exclusief effect overgang	geen falen	$U_c > 5 \text{ m/s}$ .
Strook 2 Hs=2 m	exclusief effect boom	geen falen	$U_c > 4,1 \text{ m/s}$ .
Strook 3 Hs=1 m		falen	$U_c = 3,6 \text{ m/s}$ .
Strook 4 Hs=3 m		falen	$U_c = 3,4 \text{ m/s}$ .

Op elk van de stroken waren mullengangen, echter bij strook 3 en 4 waren deze zeer uitdrukkelijk aanwezig in het bovenste taluddeel. Het ontstaan van schade is ook hier opgetreden en in de rapportage uit 2010 is ook gesteld dat mollen de aanleiding waren voor schade en later falen van de grasbekleding. Het effect van de mullengangen zit dus verwerkt in de bepaalde  $U_c$ , evenals is gedaan bij de recent uitgevoerde proeven.

### 3.6 $U_c$ uit proeven Zwolle Olst

Voor de dijkverbetering Zwolle Olst zijn op vier teststroken golfoverslagproeven uitgevoerd met de golfoverslagsimulator. De proeven zijn gerapporteerd in [7]. In deze paragraaf wordt een korte samenvatting van de proeven en de resultaten gegeven. De in deze paragraaf gebruikte figuren en conclusies zijn uit dit rapport overgenomen.

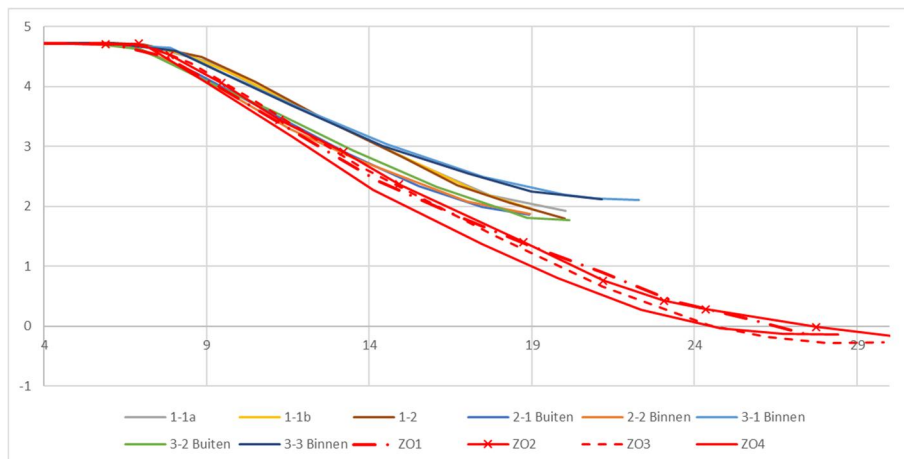
De ligging van de proefstroken is aangegeven in Figuur 3.19. Op de kruin ligt een betonpad, de overgang hiervan naar de grasbekleding is meegenomen in de proeven.



Figuur 3.19 Ligging proefstroken



De dwarsprofielen zijn samen met die van de recente Vechtdijkproeven in een grafiek gezet (Figuur 3.20). De taluds van de IJsseldijk voor het project Zwolle Olst zijn aanzienlijk hoger en langer. De gemiddelde taludhelling is voor strook 1 (ZO1) vergelijkbaar met de Vechtdijk taluds (1:3,8) waar recent proeven zijn uitgevoerd. De profielen ZO 2, ZO 3 en ZO 4 zijn gemiddeld steiler (ca. 1:3,5).



Figuur 3.20 Geometrie profielen Zwolle Olst en Vechtdijk

Het substraat bij de IJsseldijkproeven is rijker aan lutum dan bij de Vechtdijk. Volgens de verouderde NEN5104 ligt de grens tussen zand en klei bij een lutumpercentage van 8%. Hieraan wordt door sommige beproefde monsters wel en sommige niet voldaan, gemiddeld over alle monsters was het lutumgehalte 7,6%. Het grondonderzoek voor de IJsseldijk vermeldt dat het bepalen van de Atterbergse grenzen niet mogelijk was. Ook volgens de vigerende NEN-EN-ISO 14688 moet de grond daarom als zand worden aangemerkt. Zowel het substraat op de IJsseldijk als op de Vechtdijk bestaat uit zand, echter het percentage fijne deeltjes in het zand is voor de Vechtdijk aanzienlijk lager dan voor de IJsseldijk. Het percentage lutum op de Vechtdijk is 2-4%.

De graskwaliteit volgens de WBI 2017 methode is 'gesloten zode', evenals op de Vechtdijk.

De gesimuleerde golfoverslagcondities horen bij een golfhoogte van 1 m en een toenemende waterstand van een overslagdebiet van 1, 10, 30 en 50 l/s per m. De stormduur van elk van deze condities is 5 uur. Voor elk van de stroken wordt kort de schadeontwikkeling beschreven, overgenomen uit [7].

### Strook 1

Aan het einde van de proef met 50 l/s per m' is een kier ontstaan tussen het betonpad en de grasbekleding op de binnenkruin (Figuur 3.21). Dit heeft binnen de proefduur niet geleid tot uitspoeling van zand. Er is geen falen van de grasbekleding opgetreden. De proef met 50 l/s per m' is iets langer doorgezet tot 6 uur en 20 minuten, in plaats van 5 uur.



Figuur 3.21 Schade strook 1 aan het einde van de proef met 50 l/s per m

### Strook 2

Op de overgang tussen het betonpad en het gras is eerder tijdens de proefsessie een kier opgetreden en is de zode vanaf het betonpad in neerwaartse richting afgestroopt. Dit heeft niet geleid tot een doorbraak van de toplaag binnen de hele proefduur. Op het talud is schade ontstaan na 2 uur van de 30 l/s per m proef, welke gedurende het verdere proefverloop groter is geworden en lokaal verdiept. Na het einde van de 50 l/s per m proef was sprake van een doorbraak van de toplaag en daarmee falen van de grasbekleding (Figuur 3.22).



Figuur 3.22 Schade bovenaan het talud op de overgang van betonpad naar gras (links) en doorbraak van de toplaag op het talud (rechts), beide aan het einde van het proefprogramma

Deze strook bevatte in tegenstelling tot strook 1 veel molshopen en mollengangen.

### Strook 3

Er is geen schade opgetreden. Op de rand van het betonpad en het gras is geen kier ontstaan. Het gras groeit enigszins over de rand van het beton heen. De stroming krijgt vat op dit randje gras, waarbij het richting het binnentalud omklapt. Bij strook 1 en 2 heeft dit geleid tot de kier tussen gras en beton. Bij strook 3 was het gras slechts heel beperkt over het beton gegroeid, waardoor het losse randje gras korter was en de stroming er minder vat op had c.q. er minder hard aan trok.

Ook op het talud was geen sprake van schade.

### Strook 4

Er is al vrij snel schade ontstaan aan de overgang tussen betonpad en gras, maar dit heeft niet geleid tot falen van de toplaag. Na 2 uur 30 l/s per m is een schade op het talud aangebracht. Ook dit heeft niet geleid tot falen van de toplaag (Figuur 3.23).



*Figuur 3.23 Schade aan overgang betonpad naar gras en rondom een aangebrachte schade op het talud (beide einde proef na 2 uur 50 l/s per m)*

Ook op de IJsseldijk zijn hydraulische metingen gedaan en is een analyse uitgevoerd van de frontsnelheden. Op basis hiervan is de  $U_c$  voor de stroken terugerekend.

Alleen op strook 2 is falen van de grasbekleding opgetreden. Indien gebruik gemaakt wordt van de lokale frontsnelheden dan leidt dat tot  $U_c = 5,1$  m/s. Indien gebruik wordt gemaakt van de op het talud maximale gemeten frontsnelheid dan wordt een  $U_c$  berekend van 5,3 à 5,7 m/s. Geconcludeerd wordt dat de  $U_c$  voor strook 2 tussen 5,1 en 5,7 heeft gelegen, wat goed overeenkomt met de waarde van 5,3 m/s uit grastrekproeven [7]. Opgemerkt wordt dat de combinatie van een lagere frontsnelheid, maar een negatieve invloed van de overgang van betonpad naar gras zowel op de belasting als op de sterkte, niet maatgevend is geweest.

Op basis van niet falen van de grasbekleding op stroken 1, 3 en 4, in combinatie met de hoogste gemeten frontsnelheden op elk van deze stroken wordt geconcludeerd dat de  $U_c$  hier minimaal respectievelijk 5,4, 4,0 en 5,0 m/s is geweest. Dit is inclusief het effect van de aanwezige mollen en de aangebrachte schade op strook 4.

### 3.7 $U_c$ uit grastrekproeven

Ter hoogte van de drie proeflocaties van de grootschalige golfoverslagproeven op de Vechtdijk en zes aanvullende locaties zijn grastrekproeven uitgevoerd. Ook op de IJsseldijk in het kader van het project Zwolle Olst zijn grastrekproeven uitgevoerd. De grastrekproeven zijn gerapporteerd in respectievelijk [3] en [7]. Voor een gedetailleerde beschrijving van de proeven wordt hiernaar verwezen. In deze paragraaf wordt een korte beschrijving gegeven en worden de resultaten uitgezet tegen de resultaten van de grootschalige proeven.

Het doel van het uitvoeren van de grastrekproeven was om op basis van de veronderstelde sterke correlatie met de  $U_c$  uit grootschalige golfoverslagproeven, meer informatie te krijgen over de variabiliteit van de  $U_c$ . Er zijn namelijk op meer locaties grastrekproeven uitgevoerd dan golfoverslagproeven.

Bij een grastrekproef wordt met de graszodetrekker een stuk zode van 0,2x 0,2 m<sup>2</sup> uit de bekleding getrokken en wordt de hiervoor benodigde maximale kracht gemeten (Figuur 3.24).



Figuur 3.24 Grastrekproef [3]

In totaal zijn per proeflocatie 40 grastrekproeven uitgevoerd: 30 met twee zijden en 10 met vier zijden los gesneden. De trekkracht voor de zoden die aan vier zijden zijn losgesneden wordt gebruikt om de trekkracht voor de zode die aan twee zijden zijn losgesneden om te rekenen naar de trekkracht van een intacte zode. Deze trekkrachten worden vervolgens omgezet naar de kritische normaalspanningen om de  $U_c$  te bepalen. Omdat de kans dat de grasbekleding bezwijkt het grootst is op de zwakste plek wordt voor de berekening van de  $U_c$  verondersteld dat de 2,5% ondergrenswaarde van de kritische normaalspanning representatief is.

De resultaten van de grastrekproeven naast de resultaten van de grootschalige erosieproeven staan in Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Resultaten  $U_c$  uit grastrekproeven en uit golfverslagproeven

Locatie	$U_{c\_grastrekpr.}$ (m/s)	Proef- strook	Plaats	Criterium	$U_c$ (m/s)
53-3_103.4_buta	5,9	1-1a	Kruin Kruin Talud Talud	geen falen schade geen falen schade	>4,5 4,9 > 6,4 6,5 à 7
		1-2	Kruin Talud	falen geen falen	5,1 >7,1
		1-1b	Kruin Talud Talud	geen falen geen falen schade	>3,9 >5,2 5,6
9-1_14.0_buta	5,5	2-1	Kruin Talud	geen falen falen	>4,0 5,6
9-1_14.0_bita	5,4	2-2	Kruin Kruin Talud	geen falen schade geen falen	>4,7 4,8 >7,4
9-1_18.2_bita	5,7	3-1 regulier	Talud Talud	geen falen schade	>5,8 à 6,6 6,5
		3-1 aanvullend graverij	Talud	niet falen	>5,4
9-1_18.2_buta	5,8	3-2	Kruin Talud	geen falen geen falen	>4,0 >6,9 à 7,3
9-1_18.2_bita	5,7	3-3	Talud graverij Talud vak 5	falen schade	6,8 5,6
53-3_107.1_bita	5,4	-	-	-	-
53-3_107.1_buta	4,0	-	-	-	-
53-3_108.9_bita	4,9	-	-	-	-



53-3_108.9_buta	5,0	-	-	-	-
9-1_16.4_bita_A	5,7	-	-	-	-
9-1_16.4_bita_B*	4,9	-	-	-	-
53-3_101.7_buta	5,1	-	-	-	-
IJsseldijk vak 1	5,8	IJsseldijk 1	Talud	geen falen	>5,4
IJsseldijk vak 2	5,3	IJsseldijk 2	Talud	falen	5,1
		IJsseldijk 3	Talud	geen falen	>4,0
-	-	IJsseldijk 4	Talud	geen falen	>5,0

Er was in drie gevallen sprake van falen van de grasbekleding op het talud door de golfoverslagproeven: Vechtdijk strook 2-1 en 3-3 en IJsseldijk strook 2. Op de Vechtdijk strook 1-2 trad falen op, maar dat had waarschijnlijk te maken met een verzwakking door de aanaarding. Omdat de grastrekproeven hier op het talud zijn uitgevoerd en niet op deze zwakke plek wordt deze strook hier niet meegerekend.

In het geval van strook 3-3 (kort gras en graverij), trad de eerste schade op in het korte gras, maar uiteindelijk falen was ter plaatse van en door de graverij. Met de effecten van graverij wordt door de grastrekproeven uiteraard geen rekening gehouden.

Uitgaande van het criterium voor eerste schade ( $D=1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) wordt op basis van de golfoverslagproef een  $U_c$  van 5,6 m/s berekend, de grastrekproef gaf bijna hetzelfde resultaat 5,7 m/s. Kijken we naar hetzelfde talud, maar dan met lang gras, dan geeft het criterium geen falen een  $U_c$  van minimaal 5,8 m/s en eerste schade 6,5 m/s. Dit is wat hoger dan volgt uit de grastrekproeven.

Voor strook 2-1 op de Vechtdijk en strook 2 op de IJsseldijk is de met de grastrekproef gevonden  $U_{c\_grastrekproef}$  nagenoeg gelijk aan de  $U_c$  die volgt uit de golfoverslagproeven. Voor de overige locaties is de  $U_c$  op het talud niet nauwkeurig vast te stellen, alleen is een ondergrens aan te geven vanwege het niet falen van de grasbekleding binnen de proefduur. Hieruit volgt dat de grastrekproeven een resultaat geven dat lager is dan volgt uit de golfoverslagproeven (stroken 1-1a, 1-2, 2-2, 3-1, 3-2 op de Vechtdijk) of dat het resultaat van de grastrekproeven hoger is dan de ondergrens uit de golfoverslagproeven (strook 1-1b op de Vechtdijk en stroken 1, 3 en 4 op de IJsseldijk).

Het doel van de grastrekproeven was om inzicht te verkrijgen in de absolute waarde van de  $U_c$  op meer locaties dan enkel daar waar de golfoverslagproeven zijn uitgevoerd. Een tweede doel was om inzicht te krijgen in de spreiding van de  $U_c$ . Met betrekking tot het eerste doel kan worden geconcludeerd dat voor gras op zand de grastrekproeven een schatting aan de lage kant geven. De kans is groot dat een golfoverslagproef een hoger resultaat zal geven, wat niet het beoogde resultaat is, maar wel een bruikbaar resultaat. Met betrekking tot het tweede doel wordt geconstateerd dat de spreiding van de beschikbare grastrekproeven gering is ten opzichte van de verwachte spreiding uit golfoverslagproeven. Het gemiddelde resultaat van de  $U_{c\_grastrekproef}$  is 5,7 m/s met een variatiecoëfficiënt van slechts 0,04. Voor de beschikbare resultaten van golfoverslagproeven, alleen uitgaande van de taluds, wordt een gemiddelde gevonden van circa 6,3 m/s met een variatiecoëfficiënt van 0,13.

### 3.8 Relatie $U_c$ met bodem- en vegetatieparameters

In het kader van dit project is in detail gekeken naar vegetatie- en bodemparameters, zoals bijvoorbeeld de bedekking van grassen en kruiden, soortensamenstelling, granulaire samenstelling van de toplaag, wortellengte en wortelmasse. Het vegetatie- en bodemonderzoek, uitgevoerd in het voorjaar op 55 locaties langs de Vechtdijk is

gerapporteerd in P3 [9] (Figuur 3.28). In het najaar zijn parallel aan het uitvoeren van de grastrekproeven wortelmonsters gestoken op 6 locaties, 12 taluds, en onderzocht in het laboratorium. Er is een uitgebreid onderzoek gedaan naar eventuele correlaties tussen vegetatie parameters en de resultaten van de grastrekproeven. Dit onderzoek is gerapporteerd in P7 [10]. Voor details ten aanzien van deze onderzoeken wordt verwezen naar de betreffende rapportages. Deze paragraaf geeft een korte samenvatting van de doelstellingen en de belangrijkste resultaten.

### 3.8.1 Bodem

Bij aanvang van het project was bekend dat de golfoverslagproeven op de Vechtdijk uit 2010 het beeld gaven van een toplaag van zand, waarvan de korrels een bepaalde binding hadden. Het zand in de toplaag gedroeg zich onder golfoverslagomstandigheden als samenhangende grond, zonder dat hier veel lutumdeeltjes aan te pas kwamen (lutumgehalte 2-4%). Deze toplaag, waarin ook wortels aanwezig waren was in de orde van 0,3 m dik en had een positieve invloed op de erosiebestendigheid. Een klein gaatje in de zode leidde daardoor niet direct tot uitspoeling van zand gevolgd door falen van de grasbekleding. Op basis van deze voorkennis is in het kader van P3 specifiek aandacht te besteed aan eventuele verkitting van zand in de toplaag [9]. Deze werd op de 55 onderzochte locaties echter niet of nauwelijks aangetroffen (sporadisch op cm-schaal en enkel in de bovenste centimeters onder het oppervlak).

Waarnemingen in het veld tijdens de overslagproef brachten een mogelijk mechanisme aan het daglicht dat leidde tot meer bescherming van de toplaag genaamd "interne slemp". Tijdens de golfoverslagproef zorgde de grote hoeveelheid water naar het zich laat aanzien voor het suspenderen van fijne delen (lutum en silt, en soms ook ijzerdeeltjes) die aanwezig zijn in de toplaag, waarna de grond meer "in elkaar zakke" en er een glad oppervlak ontstond, welk voor water moeilijk indringbaar was. Het gevolg was veel afstroming van water en niet of nauwelijks verzwakking van de toplaag. Het mechanisme van interne slemp is een hypothese. De gevoeligheid voor slemp op basis van correlaties met de granulaire samenstelling laat zien dat deze gering is ([9]), er spelen waarschijnlijk andere factoren. Bij de grootschalige proeven op de Vechtdijk en IJsseldijk is eenzelfde relatief erosiebestendige laag als in 2010 evenwel op alle beproefde taluds aangetroffen [1].

De granulaire samenstelling van de toplaag is relatief uniform. Het lutumgehalte is gemiddeld 3%, bijna alle monsters, 54 van 55, hebben een lutumgehalte tussen 1 en 4,5%. Een uitschieter is de (verplaatste) locatie 107,1 op het binnentalud met een lutumgehalte van 7,1%. Het zandgehalte is gemiddeld 88%, variërend tussen 80 en 93%, met een uitschieter op dezelfde locatie 107,1 van 61%. Op de proeflocaties van de grootschalige proeven en de locaties met grastrekproeven was geen afwijkende granulaire samenstelling.

*In [9] zijn voor 55 locaties langs de Vechtdijk bodemprofielen opgesteld, waarin onderscheid is gemaakt in verschillende horizonten (horizont: laag die is gevormd door bodemvorming). Voor de locaties waar de grootschalige erosieproeven hebben plaatsgevonden zijn deze weergegeven in Figuur 3.25, Figuur 3.26 en*

*Figuur 3.27.*

De benaming van de hier onderscheiden horizonten is als volgt:

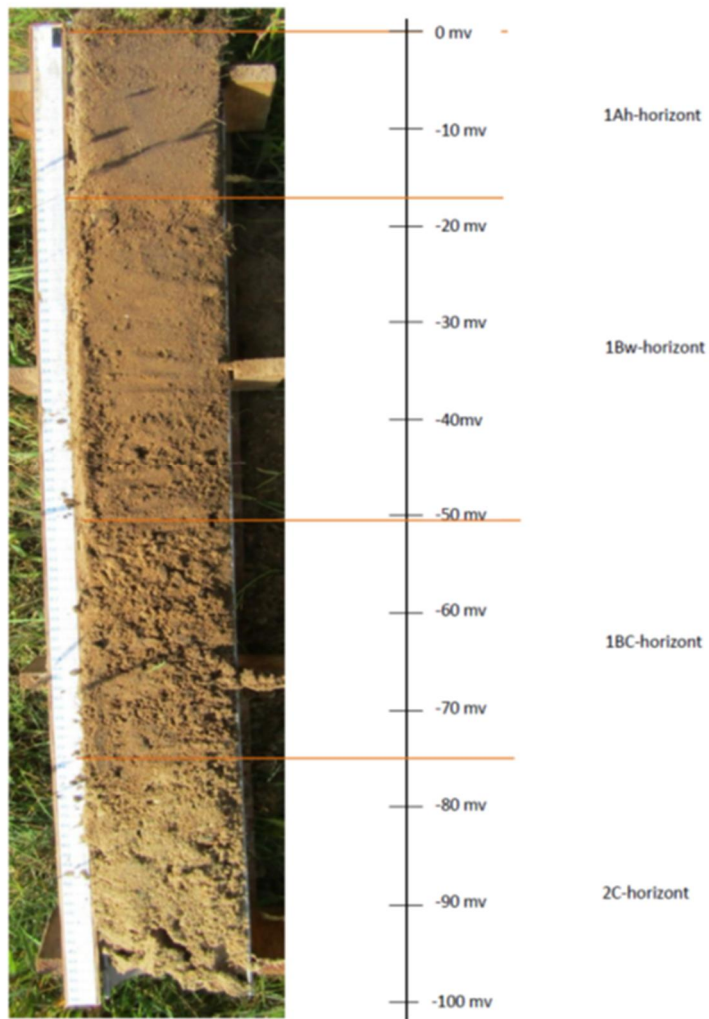
- Ah Bovenste laag waarin zich in het zand humusdeeltjes (h) of organisch materiaal heeft opgehoopt.
- Bw Laag waarin de eigenschappen van het moedermateriaal zijn veranderd door inspoeling van klei- en humus deeltjes uit de bovengelegen laag.
- C Moedermateriaal. Materiaal is niet veranderd door bodemvormende processen.

Tussen de beelden van de bodemprofielen zijn de schadebeelden als gevolg van de erosieproeven geplaatst, waarin het bodemprofiel weer is te herkennen. Het moedermateriaal C-horizont is het losse materiaal dat makkelijk wegspoelt. De A en B horizont zijn, in elk geval onder golfoverslagcondities, samenhangend en in combinatie met de aanwezige wortels ook erosiebestendig.

In de 55 bodemprofielen [9] is in alle gevallen sprake van een A of een A en B horizont boven het moedermateriaal C. Verwacht wordt dat de A horizont en mogelijk in mindere mate de B horizont zich als samenhangend gedragen in geval van erosie door golfoverslag, net als op de 5 beproefde taluds in het kader van onderhavig onderzoek, de taluds van de Vechtdijk in 2010 en de proeflocaties op de IJsseldijk.

Met verloop van tijd zal een zandbodem door bodemvormende processen een bodemprofiel ontwikkelen zoals op de Vechtdijk ook het geval is. Het is echter wel de vraag hoelang het duurt voordat een dergelijk proces effectief wordt. Waarschijnlijk gaat het hierbij eerder om tientallen jaren dan enkele jaren. Daarom wordt ontraden om zonder nader onderzoek naar dit tijdsaspect een gras op zand bekleding te ontwerpen. Voor bestaande gras op zandbekledingen wordt aanbevolen om door een bodemkundige te laten kijken in hoeverre de A en/ of B horizont zijn ontwikkeld en deze vergelijkbaar zijn met de beschrijvingen in [9]. Een methode om de samenhang in de grond te meten is binnen de kaders van dit project niet nader uitgewerkt. Indien de hypothese van interne slemp inderdaad verklarend is, dan zou hiernaar kunnen worden gekeken door het uitvoeren van een combinatie van een vloeigrensbepaling en een druppeltest. Grenswaarden hieraan kunnen echter nog niet worden gesteld. Het kan zijn dat de bindingen tussen de korrels zwak zijn, er geen sprake is van kleefkracht (breuk betekent het einde van de samenhang tussen de deeltjes) en dat deze afhankelijk is van de aanwezigheid van water. Het is niet zo dat de samenhang geheel verklaarbaar is door capillaire werking, omdat anders verwacht zou worden dat het moedermateriaal met dezelfde granulaire samenstelling, eveneens samenhang zou vertonen bij golfoverslag. Dit is niet het geval.

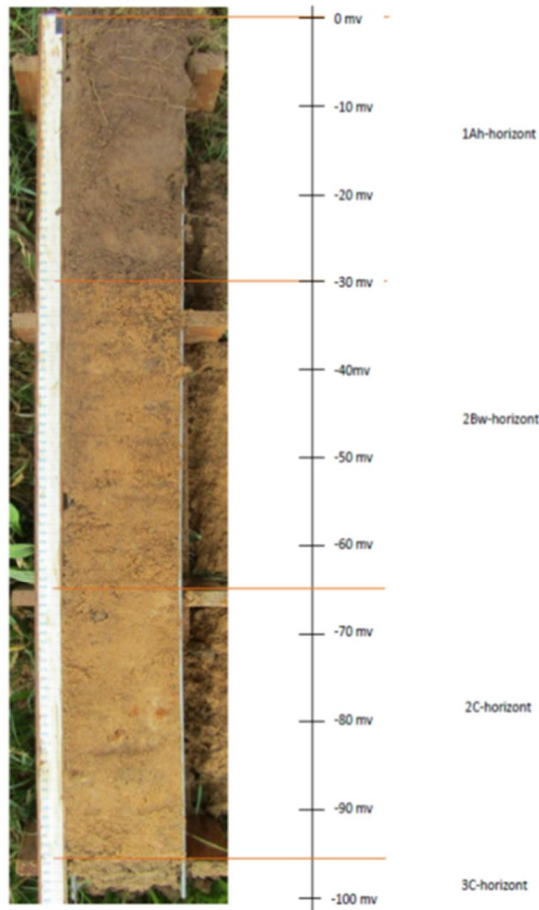
# 103.4 buiten



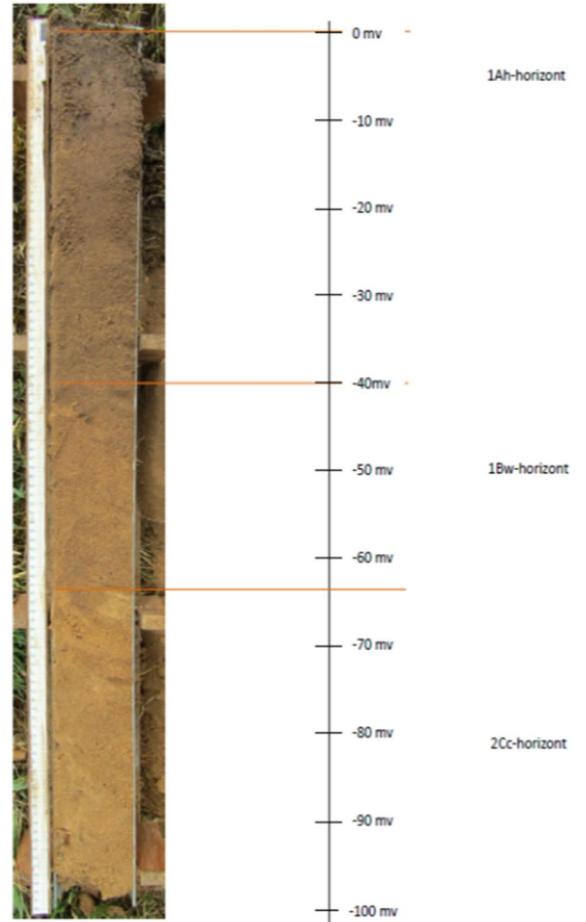
Figuur 3.25 Bodemproefiel 53-3 103.4 buiten stroken 1-1a, 1-2 en 1-1b



## 14.0 binnen



## 14.0 buiten

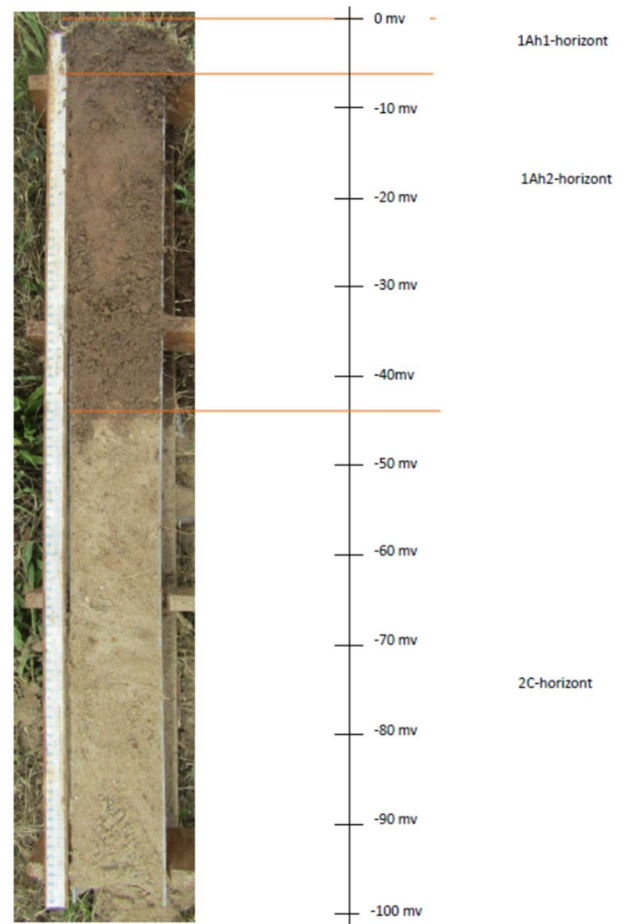


Figuur 3.26 Bodemproefiel 9-1 14.0 binnentalud strook 2-2 en buitentalud strook 2-1

## 18.2 binnen



## 18.2 buiten



Figuur 3.27 Bodemproefiel 9-1 18.2 buiten stroken 2-1 buitentalud en 2-2 binnentalud

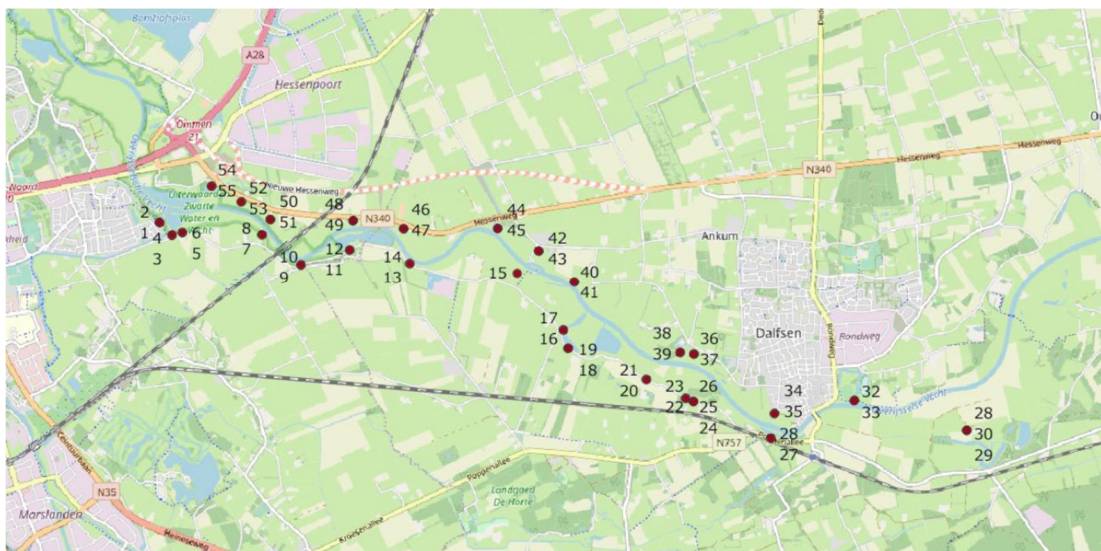
### 3.8.2

#### Vegetatie

In het voorjaar van 2020 is op 55 locaties (Figuur 3.28) een vegetatieopname gemaakt en samen met het bodemonderzoek gerapporteerd in [9]. In het najaar is op de locaties van de



grastrekproeven (Tabel 3.6) wederom een vegetatieopname gemaakt en zijn wortelmonsters gestoken. Dit werk, samen met het zoeken naar correlaties tussen wortelparameters en de grastrekproefresultaten is gerapporteerd in [10]. De hoofdoelen van deze studies waren 1) een beeld scheppen van het areaal van de voorkomende vegetaties en de variabiliteit hierin, 2) het op basis hiervan kiezen van een representatieve groep locaties voor nader onderzoek met de grastrekker en het wortelonderzoek en vervolgens met grootschalige erosieproeven en 3) zoeken naar correlaties tussen de vegetatie en wortelkarakteristieken en de  $U_{c\_grastrekpref}$ . In deze paragraaf wordt een samenvatting gegeven van de voor dit project belangrijkste resultaten.



Figuur 3.28 Situatie Vechtdijk met proefvlakken vegetatieonderzoek [9]

Op basis van de onderzochte locaties wordt geconcludeerd dat de zandige dijken langs de Overijsselse Vecht vrijwel overal goed doorworteld zijn. Op basis van de vegetatie van de hier bestudeerde proeflocaties en de opnamen die in P3 zijn gepresenteerd, wordt een homogene vegetatie en een eveneens homogene doorworteling verwacht over de beide dijktrajecten. Zeker in de bovenste 10 cm is de doorworteling vrijwel overal gelijk. In diepere lagen zorgen kruidachtige plantensoorten voor meer wortels. Op proefvlakniveau heeft de doorworteling, en met name de wortellengte en de worteldichtheid, een positief verband met de kritische normaalspanning, die wordt gebruikt voor de bepaling van  $U_{c\_grastrekproef}$ . Over het algemeen is de variatie tussen de proefvlakken relatief klein, waardoor binnen deze studie er een goed beeld is verkregen van het, over het eveneens homogene spectrum aan grasbekledingen op de zanddijken langs de Overijsselse Vecht [10].

Volgens het WBI 2017 is de dichtheid van de bovengrondse plantdelen een goede indicatie van de dichtheid van het wortelnet en is vooral het wortelnet verantwoordelijk voor de erosiebestendigheid van de grasbekleding. De dichtheid van de bovengrondse plantdelen wordt getypeerd door de bedekking. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen bedekking door grassen, kruiden, mos en kale grond. De variabiliteit in de bedekking tijdens de voorjaarsopname was aanzienlijk (zie ook Tabel 3.7, data overgenomen uit [9]).

Tabel 3.7 betreft de totale bedekking van de vegetatie, opgemaakt uit grassen en kruiden (samen 100% van de totale bedekking). Mos wordt hierin niet meegenomen. Het deel niet bedekt door grassen en kruiden kan bestaan uit kale grond of mos. De bedekking met mos wordt los gezien, een bedekking van bijvoorbeeld 70% mos, wil zeggen dat op circa 70% van het dijkoppervlak mos aanwezig is. Omdat mos zich onder de vegetatie kan bevinden kan som van de totale bedekking (grassen en kruiden) en die van mos, samen hoger zijn dan 100%. De tabel is gesorteerd van een hoge totale bedekking naar een lage bedekking.

De regels in Tabel 3.7 met een omkadering met een dikke dubbele lijn (5x) zijn beproefd met de golfoverslagsimulator en de buitentaluds ook met de golfklapgenerator. Op deze locaties zijn ook grastrekproeven uitgevoerd en er is wortelonderzoek uitgevoerd. Aanvullend op deze locaties zijn er ook locaties waar enkel grastrekproeven en wortelonderzoek zijn uitgevoerd. Dit zijn de regels met een dunne dubbele lijn. Bij de locaties die aanvullend zijn onderzocht, ofwel met grootschalige erosieproeven, ofwel met grastrekproeven en wortelonderzoek zijn alle bedekkingsgraden goed vertegenwoordigd.

Vermoed wordt dat de verhouding tussen kruiden en grassen van belang kan zijn voor de verhouding van de dichtheid van het ondiepe wortelnet (zode) en het diepere wortelnet (het onder de zode liggende deel van de toplaag) en daarmee mogelijk ook voor de erosiebestendigheid uitgedrukt in een  $U_c$ . Daarom is er bij de selectie van locaties voor aanvullend onderzoek voor gezorgd dat locaties met relatief veel en weinig kruiden vertegenwoordigd waren (blauwe vlakjes in de tabel). Zie ook [3] voor de overwegingen bij de locatiekeuzes.

Tabel 3.7 Bedekking (%) voorjaar en najaar 2020, regels omkaderd met dubbele dikke lijn = aanvullend onderzoek en grootschalige erosieproef, grastrekproeven en wortelonderzoek; regels met dunne dubbele lijn = locaties met wortelonderzoek en grastrekproeven

Object-nr	Traject Dijkpaal	Talud	Bedek totaal %	Bedek grassen %	Bedek kruiden %	Bedek mos %	Bedek totaal najaar %
4	53-3 101,7	buiten	97	96	4	4	94
8	53-3 102,8	buiten	97	87	13	30	
26	53-3 109,0	buiten	97	92	8	30	
5	53-3 101,8	binnen	96	78	22	1	
7	53-3 102,8	binnen	96	69	31	1	
1	53-3 101,5	binnen	95	89	11	6	
3	53-3 101,7	binnen	95	91	9	1	
2	53-3 101,5	buiten	94	86	14	4	
21	53-3 108,4	buiten	94	98	2	80	
30	53-3 113,0	kruin	94	93	7	3	
32	9-1 11,7	binnen	94	94	6	55	
10	53-3 103,4	buiten	93	91	9	45	89
14	53-3 104,8	buiten	93	96	4	45	
17	53-3 107,1	buiten	93	83	17	30	79
27	53-3 110,1	binnen	93	91	9	35	
31	53-3 113,0	buiten	93	93	7	60	
34	9-1 12,8	binnen	93	96	4	65	
48	9-1 18,8	binnen	93	92	8	18	
39	9-1 14,2	buiten	92	98	2	3	
52	9-1 20,4	binnen	92	96	4	15	
13	53-3 104,8	binnen	91	79	21	4	
20	53-3 108,4	binnen	90	80	20	4	
28	53-3 110,1	buiten	90	87	13	60	
43	9-1 16,4	buiten	90	88	12	5	



Object-nr	Traject Dijkpaal	Talud	Bedek totaal %	Bedek grassen %	Bedek kruiden %	Bedek mos %	Bedek totaal najaar %
45	9-1 16,7	buiten	90	86	14	2	
50	9-1 20,0	binnen	89	82	18	4	
16	53-3 107,1	binnen	88	93	7	2	87
51	9-1 20,0	buiten	87	93	7	3	
12	53-3 104,0	buiten	86	97	3	40	
19	53-3 107,4	buiten	86	97	3	85	
38	9-1 14,2	binnen	86	88	12	80	
49	9-1 18,8	buiten	86	72	28	2	
55	9-1 20,8	buiten	86	54	46	3	
22	53-3 108,9	binnen	85	96	4	40	77
6	53-3 101,8	buiten	84	75	25	15	
11	53-3 104,0	binnen	84	92	8	1	
46	9-1 18,2	binnen	84	98	2	70	90
15	53-3 106,2	buiten	83	82	18	35	
47	9-1 18,2	buiten	83	74	26	2	91
36	9-1 14,0	binnen	82	96	4	70	73
41	9-1 15,8	buiten	82	88	22	5	
54	9-1 20,8	binnen	82	93	7	70	
18	53-3 107,4	binnen	80	84	16	4	
25	53-3 109,0	kruin	78	82	18	6	
44	9-1 16,7	binnen	74	93	7	85	
53	9-1 20,4	buiten	74	46	54	2	
29	53-3 113,0	binnen	72	78	22	0	
24	53-3 109,0	binnen	70	77	23	3	
33	9-1 11,7	buiten	70	94	6	40	
35	9-1 12,8	buiten	70	70	30	55	
23	53-3 108,9	buiten	65	97	3	45	73
37	9-1 14,0	buiten	60	50	50	60	80
42	9-1 16,4	binnen	50	73	27	85	53/ 55
40	9-1 15,8	binnen	45	87	13	90	

Uit de verschillen tussen de (totale) bedekkingen in het voorjaar van 2020 en het najaar van 2020, voorafgaand aan de grootschalige proeven, blijkt dat de bedekking relatief variabel in tijd is. Locatie 9-1\_16.4 binnentalud had een slechte bedekking en dat bleef zo. Dat was herkenbaar voor het waterschap en hierop is de grasmat doorgezaaid, waardoor de locatie overigens afviel als potentiële locatie voor grootschalige erosieproeven. Locatie 9-1\_14.0 buitentalud was in 2018 beschadigd door de droogte, maar herstellend. Deze locatie had een zeer lage bedekking van 60%, maar is daarna opgeklommen tot 80% in het najaar. De bedekking van de binnentaluds van respectievelijk 9-1\_14.0 en 9-1\_18.2, beide met een hoog percentage grassen, zakte respectievelijk van 82% naar 73% en steeg van 84% naar

90%. Ook het buitentalud van locatie 9-1\_18.2 steeg van 83% naar 91%, maar dan juist met een relatief hoog percentage kruiden.

De bedekkingen van het voorjaar en het najaar zijn in Tabel 3.8 uitgezet tegen de  $U_{c\_grastrekproef}$  en de  $U_c$  die zijn teruggerekende uit de golfverslagproeven. Bij de  $U_c$  is uitgegaan van de  $U_c$  voor het talud, omdat dit de plek is waar de grastrekproeven zijn uitgevoerd. Daar waar falen is opgetreden is de hieruit teruggerekende  $U_c$  gebruikt. Daar waar geen falen is opgetreden, maar wel schade, is de  $U_c$  op basis van het schadecriterium gebuikt. Waar geen falen en geen schade is opgetreden is de ondergrens voor het talud gebruikt uitgaande van 'geen falen'. Falen en schade ter plaatse van de kruin (met name locatie 1 bij het fietspad) zijn hierbij buiten beschouwing gelaten.

Tabel 3.8 Bedekking voorjaar en najaar (%) en  $U_{c\_grastrekproef}$  en  $U_c$  (m/s) voor de locaties waar nader onderzoek heeft plaatsgevonden

Dijk-paal	Talud	Bedek totaal voorjaar %	Bedek grassen %	Bedek kruiden %	Bedek totaal najaar %	$U_{c\_grastrekproef}$ (m/s)	$U_c$ Talud (m/s)
101,7	buiten	97	96	4	94	5,1	-
103,4	buiten	93	91	9	89	5,9	6,5 (1-1a) 7,1 (1-2) 5,6 (1-1b)
107,1	buiten	93	83	17	79	4,0	-
16,4	buiten	90	88	12		-	-
107,1	binnen	88	93	7	87	5,4	-
108,9	binnen	85	96	4	77	4,9	-
18,2	binnen	84	98	2	90	5,7	6,5 (3-1)
18,2	buiten	83	74	26	91	5,8	6,9 (3-2)
14,0	binnen	82	96	4	73	5,4	7,4 (2-2)
108,9	buiten	65	97	3	73	5,0	-
14,0	buiten	60	50	50	80	5,5	5,6 (2-1)
16,4	binnen	50	73	27	53/ 55	5,7/ 4,9*	-r

\* 5,7 m/s ter plaatse van de doorzaaihandeling, 4,9 m/s net naast de doorzaaihandeling

Er lijkt nauwelijks een verband tussen de totale bedekking gemeten in het voorjaar, najaar en de  $U_{c\_grastrekproef}$  en de  $U_c$  teruggerekend uit golfverslagproeven. Het binnentalud van locatie 9-1\_14.0 (strook 2-2) geeft bijvoorbeeld een relatief lage bedekking in het voorjaar (82%) en het najaar (73%), echter niet falen van het talud gegeven de gemeten frontsnelheden leidt tot een teruggerekende  $U_c$  van minimaal 7,4 m/s, de hoogste van alle taluds. Anderzijds werd op voorhand op basis van de zichtbare open plekken aan de bovenzijde van het buitentalud van locatie 9-1\_14.0 (strook 2-1) voorspeld dat de grasbekleding op het talud het einde van de proeven niet zou halen, hetgeen ook gebeurde. De teruggerekende  $U_c$  van 5,6 m/s is aan de lage kant, maar wijkt niet enorm af van de andere teruggerekende  $U_c$ .

In het algemeen wordt geconstateerd dat de variabiliteit van de teruggerekende  $U_c$  voor gras op zand in dezelfde orde van grootte ligt als die voor gras op klei. De  $U_c$  voor een dichte zode op klei wordt gekarakteriseerd door een gemiddelde van 8 m/s en een variatiecoëfficiënt van 0,125 (-). Voor gras op zand leiden de in Tabel 3.8 teruggerekende  $U_c$ 's van alleen de Vechtdijk tot een gemiddelde van 6,5 m/s en een variatiecoëfficiënt van 0,1 (-). Gezien de

relatieve uniformiteit van de doorworteling langs de Vechtdijk (conclusie uit [10]), is het allicht niet heel verwonderlijk dat de  $U_c$  van een normaal talud niet enorm afwijkend zijn. De afwijkingen die er zijn worden daarbij ook gedeeltelijk veroorzaakt door zowel onnauwkeurigheden in de terugrekening van de  $U_c$  als ook de onnauwkeurigheden in de parameters waarmee wordt gecorreleerd, met name de bedekking (verschillend per seizoen, verschillend per plek op het talud).

Eventueel toch aanwezige correlaties blijven vooralsnog verborgen. Geconcludeerd kan desondanks worden dat gras op zand ondanks relatieve spreiding in bedekking van de vegetatie, de verhouding tussen kruiden en grassen en ontwikkeling van de bodem een hoge mate van erosiebestendigheid heeft.

### 3.9 Interpretatie resultaten $U_c$

Om te komen tot een (kans)verdeling van  $U_c$  voor gras op zand, waarmee in een volgende fase (P9 Kalibratiefase) rekenwaarden voor de kansverdeling van het kritisch golfoverslagdebiet  $q_c$  kunnen worden bepaald worden op basis van deze analyse de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De erosiebestendigheid vastgesteld door de golfoverslagproeven in het kader van dit project en eerdere projecten Vechtdijk 2010 en op de IJsseldijk voor Zwolle Olst zijn geldig voor gras op zand. Het substraat bij de proeven op de IJsseldijk bevat meer lutum dan het substraat van de Vechtdijk, maar het betreft nog altijd gras op zand. De erosiebestendigheid in termen van teruggerekende  $U_c$  zijn voor de IJsseldijk ook niet hoger dan die zijn teruggerekend voor de Vechtdijk.
- Afbakening substraat. De granulaire bodemsamenstelling (verouderde NEN5104) en vooral de eigenschappen (vigerende NEN-EN-ISO 14688) van het substraat van de IJsseldijk en de Vechtdijk vallen in de definitie zand. Voor klei gelden de  $U_c$  en  $q_c$  voor gras op klei, zoals gegeven in het WBI 2017. Voor gras op veen en gras op leem bestaan geen rekenwaarden. Er vanuit gaande dat gras op leem een resultaat geeft tussen gras op klei en gras op zand, kan veiligheidshalve worden uitgegaan van de rekenwaarden voor gras op zand, of kan specifiek onderzoek worden verricht naar beter passende rekenwaarden.
- De bodemontwikkeling van het substraat tot aan het moedermateriaal moet vergelijkbaar zijn met die bepaald in het kader van dit project (Paragraaf 3.8.1, [9]). Bij elke beschikbare gras op zand proef is het faalgedrag zoals beschreven in Paragraaf 3.4 waargenomen. Gedacht wordt dat het mechanisme van interne slemp verantwoordelijk kan zijn voor dit geobserveerde faalgedrag. Mogelijk is het al dan niet optreden van interne slemp te koppelen aan resultaten van vloeigrens- en druppelproeven, echter dit zou nader onderzocht moeten worden.
- De kwaliteit van de vegetatie voldoet aan de gestelde voorwaarden voor een gesloten zode, conform het WBI 2017. Hierbij is het visuele aspect van de geslotenheid van de bovengrondse plantdelen niet doorslaggevend, net zoals in het WBI 2017, maar de stevigheid van het wortelnet, te beoordelen door het steken van een plag. Ook voor gras op zand geldt het voorbehoud dat ruigtebegroeiing, pionierssoorten zoals bijvoorbeeld brandnetel en distels, worden uitgesloten. Over de erosiebestendigheid hiervan is onvoldoende bekend. Deze soorten worden met beheer en onderhoud gericht op de ontwikkeling van een grasmat bestreden. Correlaties met andere vegetatieparameters, soortensamenstelling of de verhouding tussen kruiden en grassen, zijn niet voldoende uitgediept om hier een helder criterium uit af te leiden.
- De lengte van het gras bij ingaan van het gesloten seizoen wordt niet meegenomen in de bepaling van de  $U_c$ . Het idee was en is dat lang gras de grond beter beschermt dan kort gras, echter dit kon met een proef met zeer kort gemaaid gras niet onderscheidend worden aangetoond.

- (Fiets)paden op de kruin: Conform de scope van het project worden overgangen van op de kruin liggende (fiets)paden meegenomen bij de bepaling van de  $U_c$ . Dit betekent dat voortijdig falen van de grasbekleding als gevolg van het aanwezig zijn van het (fiets)pad wordt verdisconteerd in de (kans)verdeling van de  $U_c$ . Er zijn twee overgangen: van het gras naar het (fiets)pad en van het fiets(pad) naar het gras. Hierbij is de overgang van het pad naar het gras aan de binnenzijde van de kruin maatgevend. Theoretisch geeft de overgang van ruw naar glad aan de buitenzijde van de kruin geen belastingverhoging [22]. Bij strook 3 op de IJsseldijk is de overgang van gras naar betonpad meegenomen [7]. Het gras werd hierbij tegen het pad aangedrukt, wat geen schade heeft opgeleverd. Bij de overgang aan de binnenzijde was dit wel het geval. Bij de Vechtdijk lag het asfalt van het fietspad verhoogd, echter deze overgang was aangeaard en zal met verloop van tijd begroeien waardoor het hoogteverschil wordt opgeheven of minimaal wordt. Voor de overgang aan de binnenzijde van de kruin geldt dat gezien de resultaten op de Vechtdijk bij locatie 1 de overgang leidt tot een iets lagere  $U_c$ . De resultaten van de proeven op de IJsseldijk gaven wel schade, maar geen falen op deze overgang. Ook hier is het effect beperkt. Dit betekent dat voor dijken zonder een (fiets)pad de rekenwaarden voor de  $U_c$  iets aan de lage kant zullen zijn. Verwacht wordt dat dit in een veiligheidsbeoordeling niet veel zal uitmaken. Daarnaast was voor locatie 9-1\_14.0, zonder (fiets)pad op de kruin, wel een verzwakking aanwezig door veelvuldig betreden van de kruin door wandelaars. Ook dit effect zit in de  $U_c$  verwerkt door de resultaten van strook 2-1 en 2-2. Voorwaarde voor het meenemen van de overgang tussen het fietspad en de kruin is een nette aansluiting van de grasbekleding op de verharding. Dit betekent dat de gesloten zode tot aan de verharding gekarakteriseerd kan worden als gesloten. Het wortelnetje blijft dicht gewoven tot aan de overgang en sluit hierop aan.
- Graverij: Net zoals voor gras op klei wordt bij de  $U_c$  bepaling uitgegaan van de onvermijdelijke aanwezigheid van dierlijke graverij tot en met het formaat van muizen en mollen. Deze waren (zeer) vertegenwoordigd in de eerdere Vechtdijkproeven 2010, maar ook op de IJsseldijk en in mindere mate, behalve bij strook 1-2 en 2-1, bij de recent uitgevoerde proeven op de Vechtdijk. Grotere in het kader van de proeven gemaakte schades bleken niet catastrofaal bepalend voor de  $U_c$ , echter het aantal was beperkt en er is twijfel of toevalligheden rondom de geometrie van deze graverij en/of de flauwe taludhelling hierin hebben geholpen. Vanwege de beperkte ervaring met grotere graverij (konijnen, vossen, honden en groter) bij golfoverslagproeven op de Vechtdijk worden deze uitgesloten bij de bepaling van de  $U_c$ . Dit leidt gezien de resultaten van de golfoverslagproeven niet tot een veel hogere  $U_c$ . De inzichten met de gemaakte schades geven zeker vertrouwen. Een enkel konijnenhol zal waarschijnlijk geen significante verhoging van de faalkans opleveren, evenals een ondiepe beschadiging door een hond. Dit is van belang voor het gevoerde beheer en onderhoud (zie Hoofdstuk 4). Een concentratie van konijnen of graverij door honden zou mogelijk wel kunnen leiden tot een significante verhoging van de faalkans, dit is echter onzeker en binnen de kaders van dit project niet bepaald.

Deze aannames leiden tot de volgende gekozen representatieve  $U_c$  per locatie (Tabel 3.9). Proefstroken die direct naast elkaar zijn uitgevoerd zijn samengevoegd tot één representatieve  $U_c$ .



Tabel 3.9 Gekozen  $U_c$  per proefstrook

Strook	Plek	Criterium	$U_c$ (m/s)	$U_c$ (m/s) per locatie
1-1a Buitentalud Berkum	Kruin Kruin, vak 4 Talud Talud, vak 14	geen falen schade geen falen schade	>4,5 4,9 > 6,4 6,5 à 7	5,1
1-2 Buitentalud Berkum	Kruin Talud	falen geen falen	5,1 >7,1	
1-1b Buitentalud Berkum (WOS)	Kruin Talud Talud, vak 16	geen falen geen falen schade	>3,9 >5,2 5,6	
2-1 Buitentalud volkstuin	Kruin Talud, vak 8	geen falen falen	>4,0 5,6	5,6
2-2 Binnentalud volkstuin	Kruin Kruin, vak 2 Talud	geen falen schade geen falen	>4,7 4,8 >7,4	4,8
3-1 Hessenweg binnentalud	Talud Talud	geen falen schade	>5,8 à 6,6 6,5	6,5
3-1 Hessenweg binnentalud – graverij – zelfde strook	Talud	geen falen	>5,4	
3-2 Hessenweg buitentalud	Kruin Talud	geen falen geen falen	>4,0 >6,9 à 7,3	6,9
3-3 Hessenweg binnentalud - kort gras en graverij)	Talud vak 10 Talud vak 5	falen schade	6,8 5,6	6,8
IJsseldijk 1	Talud	geen falen	>5,4	5,4
IJsseldijk 2	Talud	falen	5,1	5,1
IJsseldijk 3	Talud	geen falen	>4,0	
IJsseldijk 4	Talud	geen falen	>5,0	
Vechtdijk 2010 1 buitentalud Hs=2 m	Talud	geen falen	>5,0	5,0
Vechtdijk 2010 2 binnentalud Hs=2 m boom	Talud	geen falen	>4,1	3,4
Vechtdijk 2010 3 binnentaluds Hs=1 m	Talud	falen	3,6	
Vechtdijk 2010 3 binnentalud Hs=3 m	Talud	falen	3,4	

Uitschieter aan de lage kant zijn de Vechtdijkproeven uit 2010 op het binnentalud. Hier waren veel mollen aanwezig, wat het falen heeft versneld. Dit is echter een situatie die kan voorkomen. Er wordt vanuit gegaan dat mollenactiviteiten kunnen voorkomen en dat deze variabel zijn in tijd, het ene jaar is een beter mollenjaar dan het andere, en locatie langs de dijk, afhankelijk van het aanbod van voedsel en de aanwezigheid van (natuurlijke) vijanden en dergelijke.

Bij het criterium 'geen falen' waarbij dus een minimale  $U_c$  is aangetoond, is voor de  $U_c$  de minimaal aangetoonde waarde gekozen.

De 17 proefresultaten op 10 locaties geven een gemiddelde  $U_c$  van 5,5 m/s met een variatiecoëfficiënt van 0,19 (-). Er wordt uitgegaan van een normale verdeling. Er wordt hierbij impliciet vanuit gegaan dat de 10 resulterende  $U_c$  onafhankelijk zijn en een betrouwbare

doorsnede betreffen van de hele verzameling gras op zand bekledingen, waarin zowel relatief goede als slechte bekledingen zijn vertegenwoordigd. In vergelijking met een open zode op klei, is het gemiddelde iets lager en de variatiecoëfficiënt hoger (open zode op klei, respectievelijk 6 m/s en 0,125). Opgemerkt wordt dat het in veel gevallen meenemen van de minimaal aangetoonde  $U_c$ , bij geen falen, leidt tot een conservatieve schatting van de gemiddelde  $U_c$ .

Voorgesteld wordt om deze waarden toe te passen bij het afleiden van de kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet in het kader van P9.

In P9 zal tevens aandacht worden besteed aan de ruimtelijke variabiliteit in relatie tot het lengte-effect. Voor gras op klei is de onzekerheid met betrekking tot de belasting hierin leidend geweest, resulterend in de huidige lengte-effectfactoren van  $N=1, 2$  of  $3$ , afhankelijk van het watersysteem. Gekeken zal worden in hoeverre dit voor gras op zand afwijkend is.

## 4 Risicogestuurd beheer en onderhoud

Omdat zanddijken bij falen van de grasbekleding veel gevoeliger zijn voor erosie dan kleidijken, en mogelijk ook dan zanddijken met een kleibekleding, is in het kader van dit project ook gekeken naar risicogestuurd beheer en onderhoud. Hierbij wordt naar schades gekeken in relatie tot de kans op overstromen, waarbij de kans van optreden van schades, inspectiefrequentie, betrouwbaarheid van inspecties, voorspelbaarheid van extreme condities en de mogelijkheid van noodmaatregelen worden betrokken. In dit hoofdstuk wordt hier kort op ingegaan. De uitwerking wordt gegeven in bijlage D.

In bijlage D wordt een selectie gegeven van ingrepen en verbeteringen in het risicogestuurd omgaan met schades op de Vechtdijk. Een belangrijk uitgangspunt daarbij is dat als faaldefinitie is gehanteerd dat falen optreedt als de grasbekleding faalt (d.w.z. de kans op overstromen na doorbreken van de toplaag is gelijk aan 1 gesteld). Met falen van de grasmat wordt een doorbraak van de toplaag bedoeld. De dikte van de toplaag is in de orde van 0,3 à 0,4 m (zie Paragraaf 3.4). Uit de analyses in de relevantiestudie (P2 [8]) blijkt echter dat het expliciet in rekening brengen van de sterkte van de zandkern, met name bij golfklap, een grote bijdrage levert aan de algehele inschatting van de sterkte. Daarbij kunnen grote volumes zand afslaan, maar is er vaak nog wel voldoende restbreedte over om een overstroming te voorkomen. Een dergelijke faaldefinitie stemt beter overeen met de overstromingskansbenadering, maar vereist acceptatie van incidenteel grote schade, en een plan om dit eventueel snel te kunnen herstellen.

Vanuit het handelingsperspectief zijn een aantal mogelijkheden geschetst om meer risicogestuurd om te gaan met schades. Schade door grote gravers (bijv. bevers) is vrijwel altijd onacceptabel: dit vereist een aparte afweging in ontwerp en wat haalbaar is in detectie van graafschade, maar dit is iets wat breder speelt dan alleen voor de Vechtdijken.

In beheer en onderhoud zijn de belangrijkste verbeterkansen om gericht en eventueel ook frequenter te inspecteren. Het gaat daarbij om specifieke locaties, zoals de golfklapzone, steile taluds en dijkvakken met veel potentiële golfaanval én specifieke schades (bijv. graverij). Dat verkleint de kans op falen met schade. In algemene zin is het raadzaam om de grasmat te verbeteren, maar dit moet worden afgewogen met eventuele keuzes die gemaakt worden t.a.v. de versterking.

Ten aanzien van de opbouw van de dijk is met name het buitentalud kritisch: hier kan bij voor de Vecht realistische belastingen al snel schade ontstaan door golfaanval, hoewel opgemerkt moet worden dat uit [8] blijkt dat er vermoedelijk de zandkern nog een zekere sterkte heeft. In de huidige situatie draagt schade aan het buitentalud in de meeste gevallen niet veel bij aan de faalkans, omdat de sterkte op zichzelf al vrij beperkt is. Ook bij een klei-onderlaag van voldoende dikte op het buitentalud is de kwaliteit van het gras zelf van minder belang dan de erosiebestendigheid van de kleilaag, en de algehele veiligheid (ook zonder schade) neemt daarmee flink toe. Voor het binnentalud geldt dat er een afname van de erosiebestendigheid is bij schade, maar dat dit pas bij zeer grote, voor de Vecht onwaarschijnlijke, overslaggebieden het geval is. Daar is de relatieve bijdrage van een erosiebestendige laag aan de sterkte dus waarschijnlijk minder groot.

Het crisismanagement kan verbeterd worden door noodmaatregelen vooral te richten op risicovolle locaties: steile taluds, de golfklapzone en locaties met relatief grote kans op overslag. Dit geldt zowel voor de inspecties bij hoogwater als de noodmaatregelen zelf.

Uit de beschouwing blijkt dat er veel verschillende mogelijkheden zijn om de impact van schade en de algehele veiligheid van de Vechtdijken, ook in de huidige situatie, te verbeteren. Uiteindelijk kan een integrale afweging van de kosten en baten van (combinaties van) verschillende maatregelen uit het handelingsperspectief helpen bij het kiezen van de meest kansrijke verbeteringen. Op deze wijze kan worden bepaald welke aspecten van risicogestuurd B&O de grootste bijdrage leveren aan veilige dijken langs de Overijsselse Vecht. Deze analyse kan worden uitgevoerd na beoordeling van de Vechtdijken, bijvoorbeeld als onderdeel van de scopebepaling.



## 5 Conclusies

In het kader van deze rapportage P8 Analyse, zijn de proefresultaten van golfklapproeven en golfoverslagproeven op bekledingen van gras op zand verwerkt tot schattingen van de kansverdelingen van de erosieparameters voor golfoverslag en voor golfklappen.

Uitgangspunt bij deze analyse waren de bestaande erosiemodellen voor gras op klei zoals in het WBI worden toegepast. Dit is de cumulatieve overbelastingmethode voor erosie door golfoverslag en het standtijdmodel voor golfklappen. Met de resultaten van deze studie zullen in de volgende fase ('P9 Kalibratie') rekenwaarden worden bepaald.

### 5.1 Faalgedrag gras op zand bekleding

Uit de grootschalige erosieproeven blijkt dat grasbekledingen op een substraat van zand behoorlijk erosiebestendig kunnen zijn. Bij de uitgevoerde golfoverslagproeven bleek veelal dat de maximaal opgelegde belasting niet voldoende was om tot falen van de grasbekleding te komen, terwijl deze opgelegde belasting veel hoger is dan kan voorkomen langs de Overijsselse Vecht. Ook golfklappen bij een gegeneerde significante golfhoogte van circa 0,6 à 0,7 m leiden minder snel tot falen dan aanvankelijk gedacht, echter het resultaat bij de golfklapproeven is wisselend. De weerstand van een grasbekleding op zand tegen golfklappen is gemiddeld duidelijk lager dan bij grasbekledingen op klei.

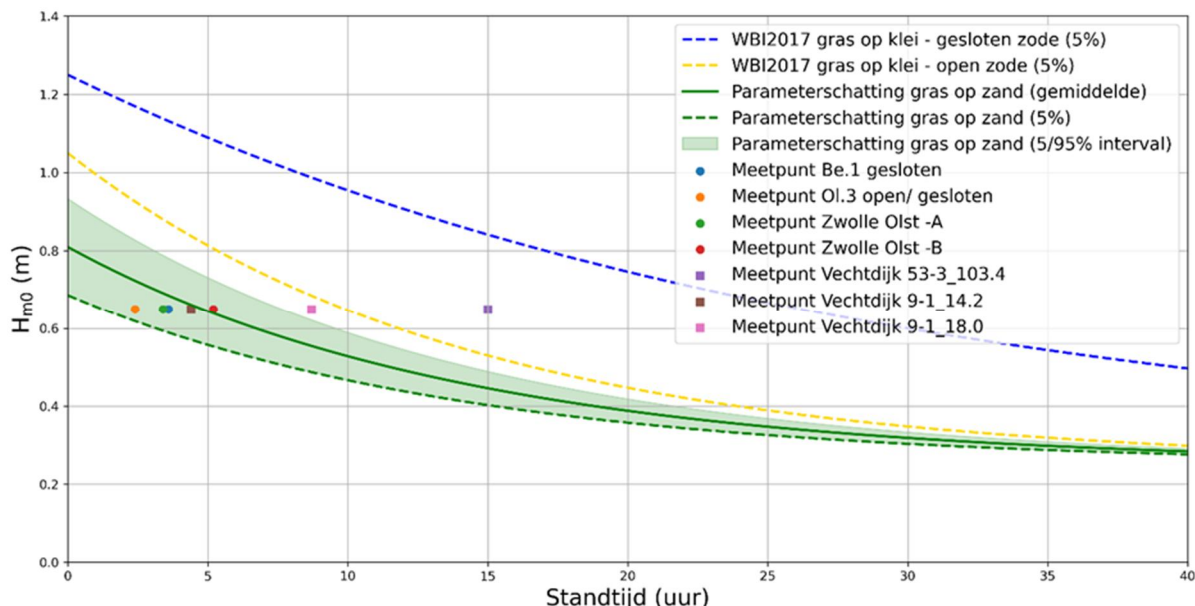
De gras op zand bekleding gedraagt zich onder een erosieve belasting door golfoverslag of door golfklappen als een twee lagen systeem. Deze twee lagen zijn samen de toplaag met een dikte van 0,3 à 0,4 m en bestaat uit een bovenste laag van circa 0,1 m (de zode) met een zeer fijn wortelnet en een hieronder gelegen laag van circa 0,2 à 0,3 m met veel minder wortels. Deze onderlaag die ook uit zand bestaat, gedraagt zich echter als samenhangend. Het falen gebeurt in twee fasen, als eerst ontstaat er bij een hoge belasting ergens een gaatje in de zode. Deze schade breidt zich vooral in oppervlakte uit, met name in stroomafwaartse richting (bij golfoverslag) of van het impactpunt af (bij golfklappen). De zode wordt als het ware afgestroopt. Bij een doorgaande belasting slijt de tweede laag langzaam door totdat ook deze laag doorbreekt. Dit faalgedrag komt overeen met grasbekledingen op een substraat van klei, echter de toplaag is bij gras op klei in de orde van 0,2 m, dus wat dunner dan bij gras op zand. Onder de toplaag bevindt zich los zand en als de stroming hier vat op krijgt, dan gaat erosie ineens veel sneller. De samenhangende toplaag van circa 0,3 à 0,4 m dikte wordt ondermijnd en brokkelt af in de erosiekuil. Door de samenhang in de toplaag, lijkt dit op het oog vergelijkbaar met een dunne klei bekleding op een zanddijk.

De observatie van een samenhangende toplaag met een dikte van 0,3 à 0,4 m is gezien bij alle beschikbare erosieproeven op grasbekledingen op een substraat van zand. Gedacht wordt dat het mechanisme van interne slemp verantwoordelijk kan zijn voor de samenhang in het zand in de toplaag. Ook is gezien dat de doorworteling tot deze diepte van 0,3 à 0,4 m komt. Waarschijnlijk zijn de diepere wortels met name afkomstig van de aanwezige kruiden. Grassen wortelen in het algemeen minder diep.

Door deze opbouw van de toplaag blijkt de bekleding ook minder gevoelig voor schades dan verwacht zou kunnen worden voor zand. Zowel aanwezige mollengangen als diverse aangebrachte schades leiden niet tot een snelle doorbraak van de toplaag.

## 5.2 Standtijden voor golfklappen

Voor de onderbouwing van standtijdlijnen voor gras op zand waren negen proefresultaten beschikbaar; twee proefresultaten bij een kleine golfhoogte in een golfgoot en zeven proefresultaten met de golfklapgenerator, waarvan drie in het kader van dit project op de Vechtdijk. De spreiding in de standtijden bij de golfklapgeneratorproeven is relatief groot. De proeven waren niet voldoende in aantal en onderscheidend naar een bepaalde parameter om onderscheidende verzamelingen te maken. Alle data is als één set beschouwd. Dit heeft geleid tot standtijdlijnen welke afhankelijk van de gewenste onderschrijdingskans kunnen worden bepaald. Voor de 5% onderschrijdingskans en voor het gemiddelde staan de lijnen en parameters a, b en c in Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Schatting van de standtijdlijnen gras op zand op basis van de 5% ondergrens en het gemiddelde en de bijbehorende parameters a, b en c (rechts)

De verdeling van standtijdlijnen kan worden gebruikt voor het bepalen van rekenwaarden in een semi-probabilistische beoordeling voor gras op zand in de golfklapzone.

Bij het gebruik van de standtijdlijnen geldt het voorbehoud van een gesloten zode (op zand) conform de WBI2017 omschrijving.

Er is bij deze standtijdlijnen geen rekening gehouden met de invloed van schades, bijvoorbeeld door graverij. Zonder nadere onderbouwing kan worden verondersteld dat een gras op zand bekleding in de golfklapzone significant verzwakt zal worden door graverij indien dat voorkomt. In een apart hoofdstuk over risico gestuurd beheer en onderhoud zijn handvatten gegeven over hoe hiermee kan worden omgegaan, waarbij wordt gekeken naar de overstromingskans in relatie tot het negatieve effect van graverij, het ondervangen hiervan door inspecties en reparaties, het in rekening brengen van reststerkte en de invloed van noodmaatregelen voor en tijdens hoogwater.

## 5.3 Golfoverslag

Voor de onderbouwing van de kansverdeling van de kritische frontsnelheid  $U_c$  voor gras op zand waren 17 proeven beschikbaar op 10 locaties. Vier proeven op de Vechtdijk uit 2010, vier op de IJsseldijk voor het project Zwolle Olst en negen in het kader van dit project, eveneens op de Vechtdijk. In de meeste gevallen was er geen sprake van falen van de

grasbekleding. Dit ondanks een opgelegde golfoverslagbelasting die ruim uit gaat boven wat voor de Vechtdijk voorstelbaar is.

Voor proeven waar geen falen van de grasbekleding optrad, maar wel schade, is de  $U_c$  gebaseerd op het (minder betrouwbare) criterium voor schade. Daar waar ook geen schade optrad is teruggerekend welke  $U_c$  minimaal aanwezig was en is deze gebruikt. Op deze manier zijn voor de 17 proeven en 10 locaties 10 waarden van  $U_c$  berekend. De verzameling geeft een gemiddelde van 5,5 m/s en een variatiecoëfficiënt van 0,19 (-). Er wordt uitgegaan van een normale verdeling. Dit is een wat lager gemiddelde dan voor een open zode op klei (6 m/s) en de variatiecoëfficiënt is groter (0,125 voor gras op klei). Voorgesteld wordt om deze verdeling te gebruiken bij het afleiden van rekenwaarden van de kansverdelingen van het kritisch golfoverslagdebiet in de volgende fase van dit project (P9 Kalibratie).

De voorgestelde kanttekeningen en voorwaarden bij de kansverdeling van  $U_c$  worden als volgt samengevat:

- Afbakening substraat. De granulaire bodemsamenstelling (verouderde NEN5104) en vooral de eigenschappen (vigerende NEN-EN-ISO 14688 ) van het substraat van de IJsseldijk en de Vechtdijk vallen in de definitie zand. Voor klei gelden de  $U_c$  en  $q_c$  voor gras op klei, zoals gegeven in het WBI2017. Voor gras op veen en gras op leem bestaan geen rekenwaarden. Er vanuit gaande dat gras op leem een resultaat geeft tussen gras op klei en gras op zand, kan veiligheidshalve worden uitgegaan van de rekenwaarden voor gras op zand, of kan specifiek onderzoek worden verricht naar beter passende rekenwaarden.
- De bodemontwikkeling van het substraat tot aan het moedermateriaal moet vergelijkbaar zijn met die bepaald in het kader van dit project (paragraaf 3.8.1, [9]).
- De kwaliteit van de vegetatie voldoet aan de gestelde voorwaarden voor een gesloten zode, conform het WBI2017. Hierbij is het visuele aspect van de geslotenheid van de bovengrondse plantdelen niet doorslaggevend, net zoals in het WBI2017, maar de stevigheid van het wortelnet, te beoordelen door het steken van een plag. Ook voor gras op zand geldt het voorbehoud dat ruigtebegroeiing, pionierssoorten zoals bijvoorbeeld brandnetel en distels, worden uitgesloten. Over de erosiebestendigheid hiervan is onvoldoende bekend. Deze soorten worden met beheer en onderhoud gericht op de ontwikkeling van een grasmat bestreden. Correlaties met andere vegetatieparameters, soortensamenstelling of de verhouding tussen kruiden en grassen, zijn niet voldoende uitgediept om hier een helder criterium uit af te leiden.
- (Fiets)paden op de kruin: Conform de scope van het project worden overgangen van op de kruin liggende (fiets)paden wel meegenomen bij de bepaling van de  $U_c$ . Dit betekent dat voortijdig falen van de grasbekleding als gevolg van het aanwezig zijn van deze overgang is verdisconteerd in de (kans)verdeling van de  $U_c$ . Dit heeft geleid tot een wat lagere  $U_c$ . De resultaten van de proeven op de IJsseldijk gaven wel schade, maar geen falen op deze overgang. Ook hier is het effect beperkt. Dit betekent dat voor dijken zonder een (fiets)pad de rekenwaarden voor de  $U_c$  iets aan de lage kant zullen zijn. Verwacht wordt dat dit in een veiligheidsbeoordeling niet veel zal uitmaken. Daarnaast was voor locatie 9-1\_14.0, zonder (fiets)pad op de kruin, wel een verzwakking aanwezig door veelvuldig betreden van de kruin door wandelaars. Ook dit effect zit in de  $U_c$  verwerkt door de resultaten van strook 2-1 en 2-2. Voorwaarde voor het meenemen van de overgang tussen het fietspad en de kruin is een nette aansluiting van de grasbekleding op de verharding. Dit betekent dat de gesloten zode tot aan de verharding gekarakteriseerd kan worden als gesloten. Het wortelnetje blijft dicht gewoven tot aan de overgang en sluit hierop aan. *Opgemerkt wordt dat de gekozen aanpak om het effect van een fietspad op de kruin mee te nemen in de  $U_c$  in plaats van in invloedsfactoren  $\alpha_M$  en  $\alpha_S$  een afwijking is van de reguliere modellering de cumulatieve overbelasting. Er moet worden opgelet dat in de toekomst hierdoor geen dubbel telling gaat optreden als de cumulatieve overbelasting direct in het BOI wordt geïmplementeerd en voor de*

*aanwezigheid van een fietspad aanvullend invloedsfactoren voor het fietspad worden gehanteerd.*

- Graverij: Net zoals voor gras op klei wordt bij de  $U_c$  bepaling uitgegaan van de onvermijdelijke aanwezigheid van dierlijke graverij tot en met het formaat van muizen en mollen. In veel van de proefstroken waren molgangen aanwezig. In enkele proefstroken zelfs veel molgangen. Dit heeft op twee stroken geleid tot eerder falen van de grasbekleding en daarmee tot een lagere  $U_c$ . Grotere graverij is niet verdisconteerd in de kansverdeling van de  $U_c$ . De proeven die uitgevoerd zijn op gesimuleerde graverij van konijnen, honden en vossen geven wel aan dat de graverij zeker niet altijd direct kritisch is. Net als voor schades bij golfklappen wordt in een apart hoofdstuk over risicogestuurd beheer en onderhoud aandacht besteed aan deze schade, inspectie, reparatie, reststerkte en noodmaatregelen in het licht van het risico op een overstroming. Het advies is om in het kader van beoordeling en scopebepaling het geschetste handelingsperspectief voor de Vechtdijken expliciet af te wegen om zo te komen tot een doelmatige combinatie van beheer en onderhoud en versterkingsmaatregelen.



## 6 Referenties

- [1] FACTUAL REPORT PRAKTIJKPROEVEN GRAS OP ZAND, Infram Hydren, 19i824, versie 2.0, 8 juni 2021
- [2] Golfoverslagproeven op de Vechtdijken Hydraulische metingen voor de golfoverslagen golfloopsimulator, Van der Meer Consulting, projectnummer vdm19500, versie 2.0, 3 mei 2021
- [3] Gras op zand, voorbereiding grootschalige proeven. Locatiekeuze, proefprogramma en predictie, Deltares kenmerk 11204369-002-GEO-0012, definitief 23-3-2021
- [4] BOI Omgaan met overgangen bij faalmechanisme gras erosie kruin en binnentalud, Korte studie naar kansverdelingen van het kritisch overslagdebiet inclusief overgangen, Deltares kenmerk 1203720-025-GEO-0001, versie 1.0, november 2019.
- [5] Stand van zaken kennis gras op zand, Product 1, Deltares kenmerk 11204369-002-GEO-0002, versie 1.0 definitief, juli 2020.
- [6] WTI Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium Product 5.12 Analyses grass erosion in wave run-up and wave overtopping conditions, kenmerk 1209437-005, versie 3 definitief, maart 2015
- [7] ANALYSE EN DUIDING GOLFOVERSLAGPROEVEN IJSSELDIJK, Infram kenmerk 19i814, versie 3, 27 augustus 2020
- [8] Relevantie-onderzoek gras op zand, Product 2, Deltares kenmerk 11204369-002-GEO-0005, versie 1.0 definitief, augustus 2020
- [9] Gras op Zand, P3: Ruimtelijke variabiliteit, vegetatie en bodemonderzoek, N. van Rooijen, C. Liebrand, M. Evers, E. Visser en Hans de Kroon.
- [10] Onderzoek Gras op Zand, P7: Doorworteling en treksterkte, N. van Rooijen, C. Liebrand, M. Evers, E. Visser, N. Bisschops en H. de Kroon
- [11] Analyse en duiding golfklapproeven IJsseldijk, Infram-Hydren, projectnummer 19i814, versie 2.0, d.d. 18 augustus 2020
- [12] Stand van zaken kennis gras op zand, Product 1, Deltares kenmerk 11204369-002, versie 1.0 definitief, 26 juni 2020.
- [13] Laboratoriumproeven Erosie en Afslag van Grastaluds, Th. Wolffenbuttel, afstudeerverslag TH Delft, December 1989
- [14] Plan van Aanpak Grasonderzoek, Verdere ontwikkeling van rekenregels op gras voor keringen, versie 1.0.0 definitief, d.d. 1 augustus 2019, G.J. Steendam et al., Waterschap Drents Overijsselse Delta en Infram Hydren.
- [15] Semi-probabilistic assessment of wave impact and runup on grass revetments WTI Product C.4, Deltares kenmerk 1220080-005, final, versie 2, December 2016
- [16] USE OF WAVE IMPACT GENERATOR AND WAVE FLUME TO DETERMINE STRENGTH OF OUTER SLOPES OF GRASS DIKES UNDER WAVE LOADS, Van Steeg, P., et al, ICCE2014 Proceedings
- [17] DESIGN OF WAVE IMPACT GENERATOR TO TEST STABILITY OF GRASS SLOPES UNDER WAVE ATTACK, Van Steeg, P. et al. Coastlab 2014 Proceedings
- [18] Uncertainties erosion model grass wave impact zone, Memo d.d. 14-7-2015, Deltares projectnummer 1220086
- [19] Studie voor richtlijnen klei op dijktaluds in het rivierengebied, drs. G.A.M. Kruse, Deltares kenmerk 1202512-000-GEO-0002, 2010
- [20] Kruschke, J.K. Bayesian estimation supersedes the t test. J. Exp. Psychol. Gen. 2013, 142, 573–603, doi:10.1037/a0029146.
- [21] EurOtop, 2018. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J.,

Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B.,  
[www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com)

- [22] WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium Product 5.8 Validatie erosiebestendigheid, Deltares nummer 1209437, definitief versie 2, juni 2015
- [23] Residual strength of grass on river dikes under wave attack. Phase 3: Large – scale physical model tests in the Delta Flume (Harculo and Oosterbierum). Van Steeg, P., Deltares report 1207811-009-HYE-0011, 2014.

# A Videoanalyse frontsnelheden

Bijlage memo Joost den Bieman.

## Memo

**Datum**

25 juni 2021

**Contactpersoon**

Joost den Bieman

**Doorkiesnummer**

+31(0)88 335 8292

**E-mail**

Joost.denBieman@deltares.nl

**Aantal pagina's**

1 van 4

**Onderwerp**

Gras op zand videoanalyse

## 1 Frontsnelheden uit videoanalyse

In duplo met de handmatige analyse van de videobeelden, is er ook een geautomatiseerde videoanalyse uitgevoerd om de frontsnelheid per golf te bepalen. Onderstaand worden de methode beknopt toegelicht, de resultaten met de handmatige analyse vergeleken, en de verdere mogelijkheden van dit type videoanalyse nader beschreven.

### 1.1 Methode

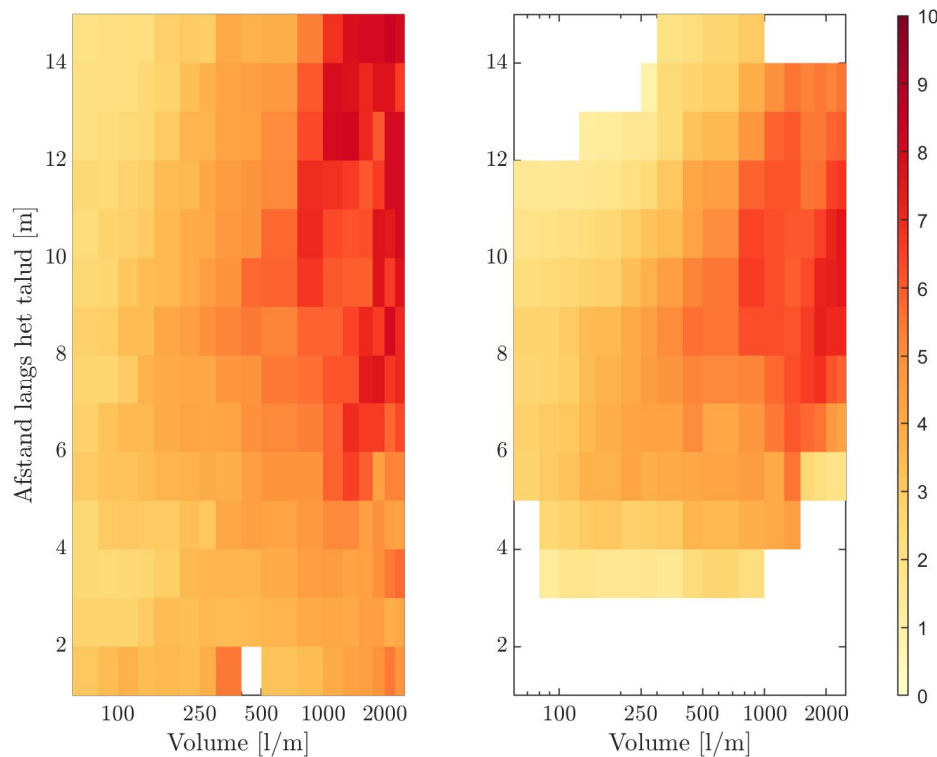
Voor de automatische bepaling van de frontsnelheden uit de video wordt gebruikt gemaakt van kunstmatige intelligentie (ook wel AI: artificial intelligence). Deze methode wordt met een aantal voorbeelden geleerd om het golffront uit de video te herkennen. Na deze leerstap wordt de methode gebruikt om voor ieder frame de positie van het golffront te bepalen, om daar vervolgens de frontsnelheid uit te berekenen. Het resultaat is dus per frame in de video de positie en snelheid van het golffront, inclusief de variatie over de breedte. De resolutie in de tijd is hetzelfde als de frame rate van de video, de resolutie in de ruimte hangt af van het aantal pixels. Deze methode is eerder toegepast en gevalideerd in lab experimenten (Den Bieman et al., 2020).

Voor een succesvolle toepassing van deze techniek is een aantal zaken belangrijk, namelijk videobeelden van goede kwaliteit, visuele afstandsmarkeringen op de dijk en een camera met beperkte lensbolling. De eerste twee aspecten zijn bij de gras op zand proeven voldoende het geval. De gebruikte camera op de mast heeft echter wel een lensbolling die groter is dan strikt wenselijk. Hierdoor kan er wat onnauwkeurigheid in de positiebepaling van het front optreden, met name aan de randen van het beeld (in dit geval de binnenkruinlijn en de binnenteen van de dijk).



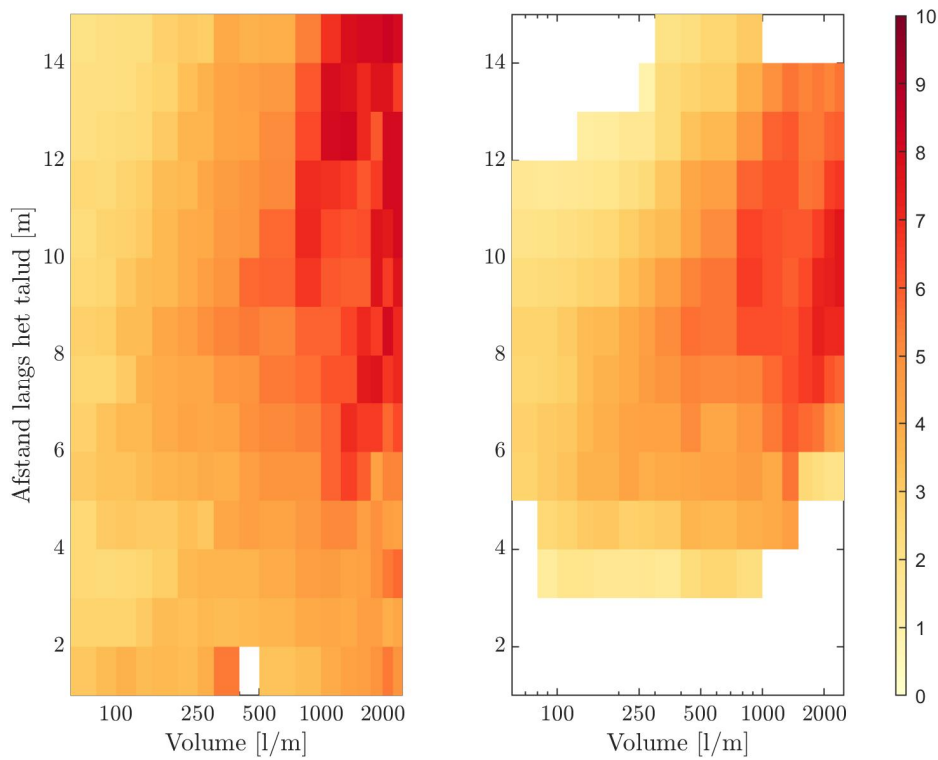
## 1.2 Resultaten vergelijking

Ter validatie zijn de beelden van Teststrook 3.1 geanalyseerd en vergeleken met de uitkomsten van de handmatige analyse. In

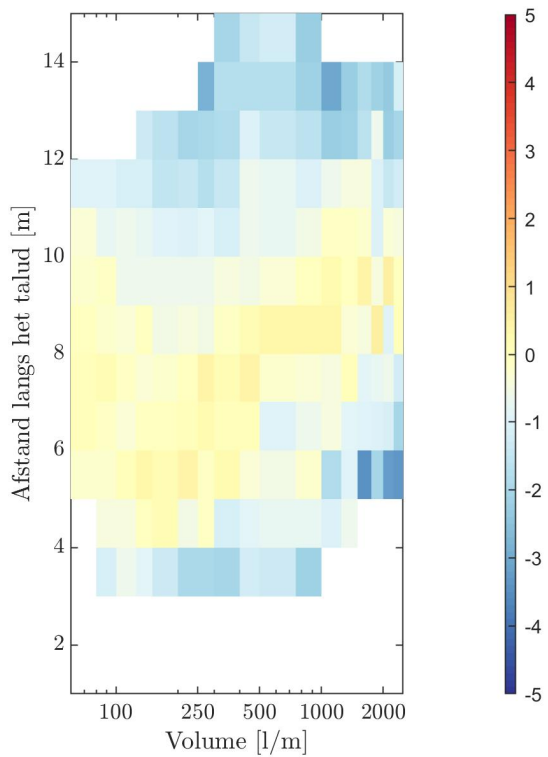


Figuur 1 wordt de front snelheid (gemiddeld over meerdere golven met hetzelfde volume) uitgezet tegen het volume van de golf (horizontaal) en de afstand tot de uitstroomopening, gemeten langs het talud (verticaal). Het linker paneel geeft de resultaten van de handmatige analyse weer, het rechter paneel die van de automatische videoanalyse. Merk hierbij op dat de data in het rechter paneel een grotere ruimtelijke resolutie heeft dan die in het linker paneel.

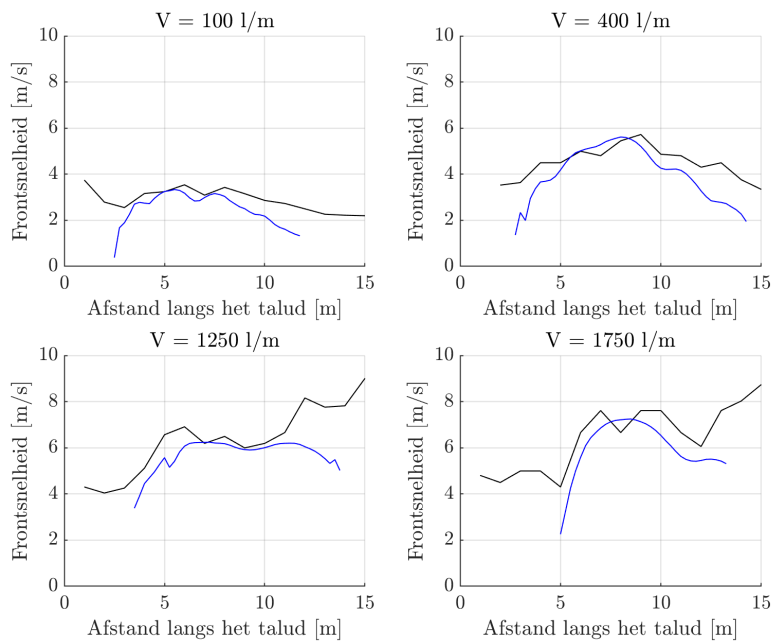
Het algehele verloop is redelijk vergelijkbaar, de belangrijkste verschillen (zie Figuur 2) zijn dat de snelheden in het uit de automatisch analyse iets lager zijn dan die van de handmatige analyse. Ook zijn er aan de uiteinden van het beeld (golfweg 1-3m en 12-15m) ontbrekende waarden en iets grotere afwijkingen te zien, hetgeen beter is te zien in de voorbeelden in Figuur 3. Deze discrepantie is vermoedelijk (deels) te wijten aan de sterkere lensvervorming op die plekken. Daarmee verdient het de aanbeveling om bij een eventueel vervolg ofwel een camera met een minder vervormende lens te gebruiken, ofwel een correctie af te leiden en daarmee de vervorming te corrigeren in de resultaten.



Figuur 1 Vergelijking van de gemiddelde frontsnelheden (in m/s) tussen de handmatige analyse (links) en de automatische analyse (rechts) uitgezet tegen het volume van de golf en de afstand langs het talud.



Figuur 2 Verschillen tussen de gemiddelde frontsnelheden (in m/s) getoond in Figuur 1.



Figuur 3 Vergelijking van de gemiddelde frontnelheden tussen de handmatige analyse (zwart) en de automatische analyse (blauw) voor vier volumes.

### 1.3 Mogelijkheden

De belangrijkste voordelen van de videoanalyse op basis van kunstmatige intelligentie zijn dat de techniek minder arbeidsintensief is dan handmatige analyse en dat de resultaten een grotere resolutie in de tijd en ruimte hebben.

Met name de hoge resolutie biedt de mogelijkheid om zeer gedetailleerd te kijken naar bijvoorbeeld de invloed van initiële schade op het talud op de frontnelheid. Doordat het hele golfvolumen over de breedte bekend is, kan dit ook als de schade zich niet over de gehele breedte van de teststrook voordoet.

Daarnaast wordt het beter mogelijk om de onzekerheid in de frontnelheid, gegeven een volume, expliciet mee te nemen. Het is met deze methode weinig arbeidsintensief om vele herhalingen van hetzelfde golfvolumen te analyseren. Hiermee kan een completer beeld gevormd worden van de onzekerheid van de frontnelheid.

### 1.4 Referenties

Den Bieman, J.P., M.P. de Ridder en M.R.A. van Gent, 2020. Deep learning video analysis as measurement technique in physical models. *Coastal Engineering* (158), 103689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103689>

## B Invloed variabiliteit frontsnelheid per volume op $U_c$

Indien meerdere gelijke volumes worden losgelaten op eenzelfde talud uit dezelfde simulator, dan leidt dit toch tot een wisselende meting van de frontsnelheid.

Dit komt enerzijds door onnauwkeurigheden in de meting, met name door het discrete en bij hoge snelheden relatief lage aantal beelden dat het front nodig heeft om één meter te overbruggen. Anderzijds komt het door toevalligheden in de keten van gebeurtenissen, van het openen van de klep tot het aankomen van het volume onderaan het talud.

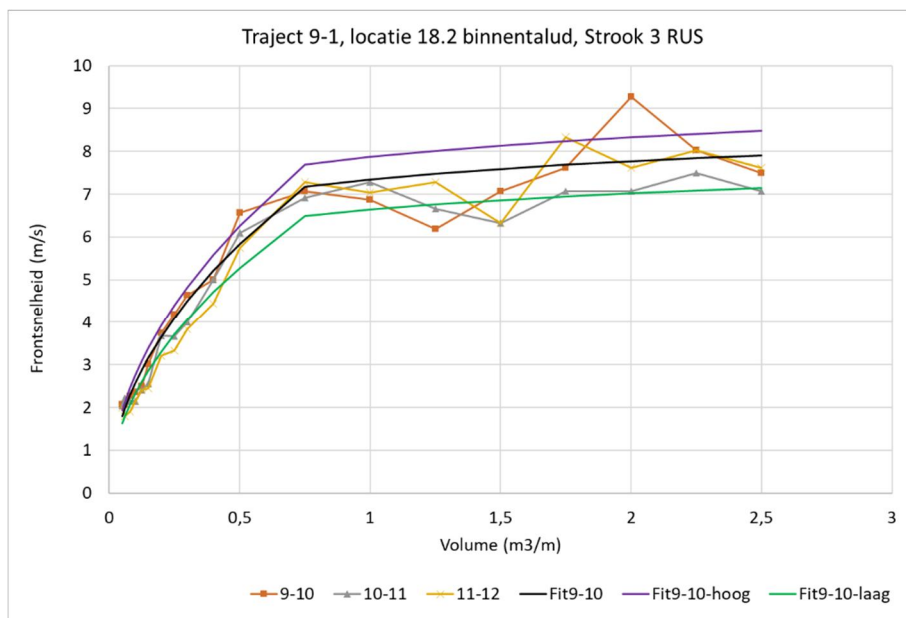
Het terugrekenen van de  $U_c$  gebeurt met een formule die de relatie geeft tussen het losgelaten volume en de frontsnelheid voor een bepaalde locatie ten opzichte van de uitstroomopening. Hierbij is uitgegaan van een benadering van het gemiddelde van de frontsnelheid. In deze paragraaf wordt gekeken naar de invloed van verschillen in de benaderingsfunctie binnen de bandbreedte van de variabiliteit op de teruggerekende  $U_c$ . Een beeld van de variabiliteit in frontsnelheid wordt geschetst in Figuur 6.1.



Figuur 6.1 Frontsnelheid (m/s) tegen afstand van de uitstroomopening voor 4 volumes van 200 l/s en 3 volumes van 1750 l/m.

Te zien is dat de bandbreedte van de metingen in de orde van 1 m/s is. In Figuur 6.2 staan voor de vakken 9-10, 10-11 en 11-12 de gemeten frontsnelheden, de gemiddelde fit en een fit aan de hoge en lage kant van de metingen. De naamgeving van de vakken betreft de afstand tot de uitstroomopening in meter, langs het talud gemeten. De fitparameters staan in Tabel 6.1.





Figuur 6.2 Gemeten frontsnelheden bij vak 9-10, 10-11 en 11-12, de fit voor 9-10, gemiddeld, hoog en laag

Tabel 6.1 Fit-parameters locatie 2 strook 1

	vak 9-10 (gem.)	vak 9-10 (hoog)	vak 9-10 (laag)
<b>a</b>	8,31	8,91	7,51
<b>b</b>	0,51	0,51	0,51
<b>knip (m³/m)</b>	0,75	0,75	0,75
<b>a</b>	7,34	7,79	6,73
<b>b</b>	0,08	0,08	0,08

Voor strook 3 op locatie 3, is falen van de toplaag opgetreden na 1 uur in de proef met 190 l/s per m' golfoverslag bij een gesimuleerde golfhoogte van 1 m. Terugrekenen van de  $U_c$  leidt voor de drie varianten laag, gemiddeld en hoog tot:

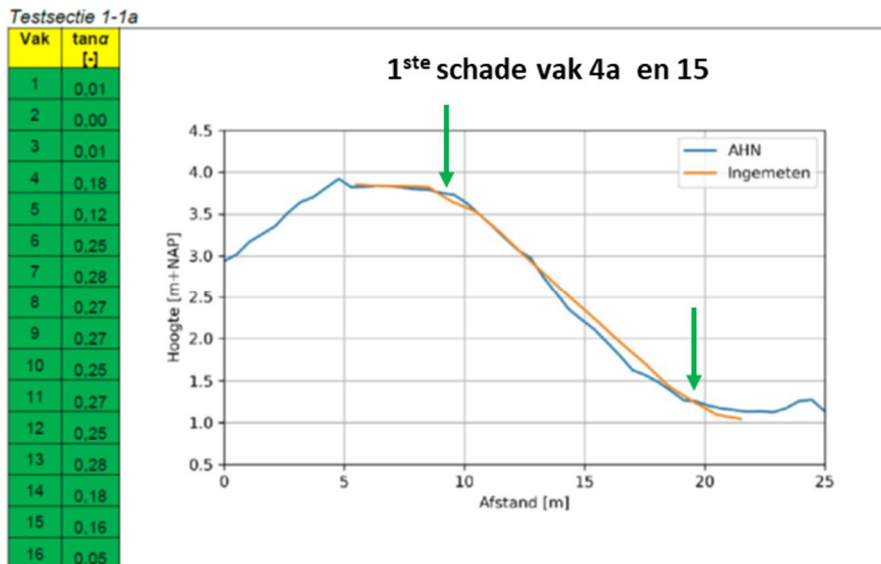
Lage fit  $U_c=6,7$  m/s  
 Gemiddelde fit  $U_c=6,8$  m/s  
 Hoge fit  $U_c=7,0$  m/s.

De uitwerking van de variabiliteit in de frontsnelheid beperkt zich tot enkele procenten. De nauwkeurigheid van de fit en metingen zijn slechts beperkt van invloed op de teruggerekende  $U_c$ .

# C Frontsnelheden per proefstrook

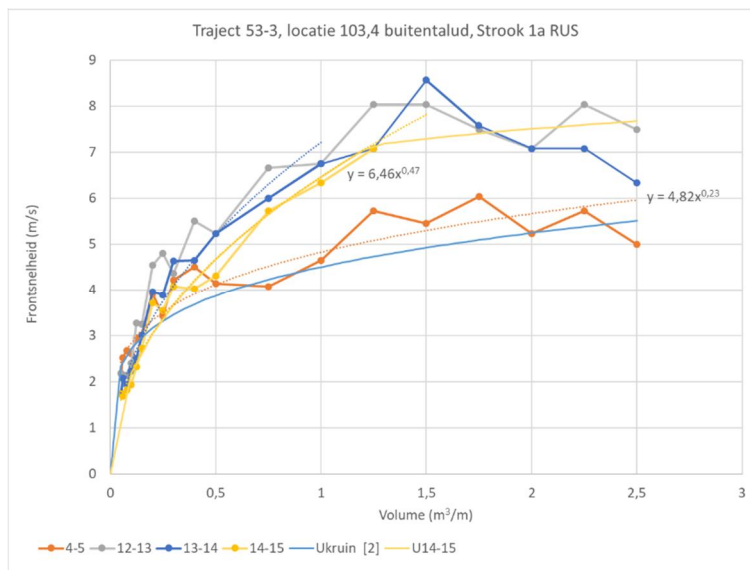
## C.1 Locatie 1-1a RUS

Locatie 1 ligt bij Berkum in Traject 53-3 bij Dijkpaal 103,4. Alleen het buitentalud is beproefd. Het maaiveld is lokaal ingemeten en uit het AHN gehaald (Actueel Hoogtebestand Nederland; [www.ahn.nl](http://www.ahn.nl)). De kruin is circa 5 m breed en voorzien van een asfaltweg. Het lokaal steilste stukje talud is 1:3,6, gemiddeld is de helling 1:3,8 (Figuur 6.3). Schade trad op in vak 4a, daar waar de kruin overgaat naar het talud en vak 15, onderaan het talud.



Figuur 6.3 Dwarsprofiel locatie 1-1a obv AHN en lokaal ingemeten [1] met de plaatsen van eerste schade in (m) ten opzichte van de uitstroomopening van de simulator

De per volume gemiddelde gemeten frontsnelheden tegen losgelaten volume voor de vakken 4-5 (schade), 12-13, 13-14 (hoogste frontsnelheden) en 14-15 (schade) zijn uitgezet in Figuur 6.4. Hierin is eveneens de formule voor de kruin aangegeven op basis van de analyse uit [2].



Figuur 6.4 Frontsnelheden (m/s) tegen volume (m<sup>3</sup>/m) voor locatie 4-5, 12-13, 13-14 en 14-15 (meter van de uitstroomopening)

Een fit door de metingen van vak 4-5 ligt net iets hoger dan  $U_{\text{kruin}}[2]$ , voor de verdere analyse wordt uitgegaan van de fit voor vak 4-5.

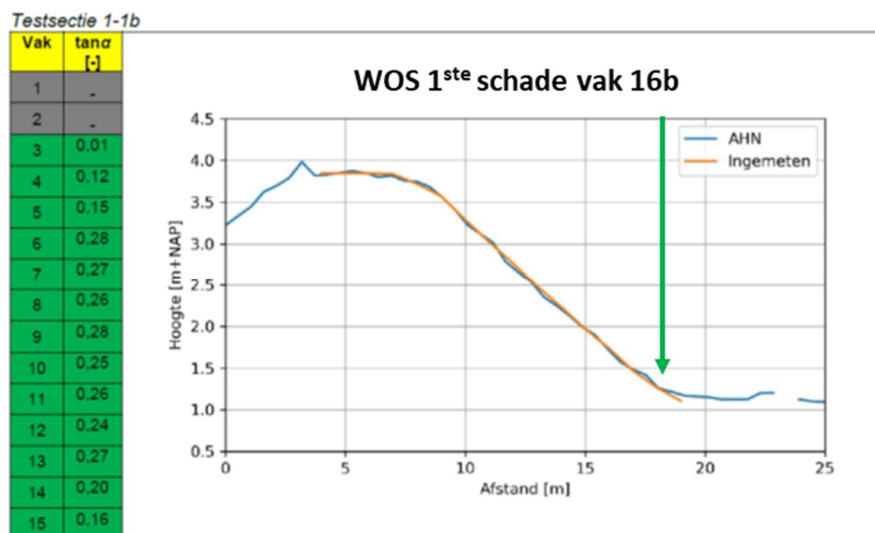
Voor vak 14-15 zijn geen frontsnelheidsmetingen beschikbaar voor volumes groter dan  $1,25 \text{ m}^3/\text{m}$ . Te zien is dat de trend van de frontsnelheid tot  $1,25 \text{ m}^3/\text{m}$  in lijn is met de metingen voor vakken 12-13 en 13-14, maar dan iets aan de lage kant. Hier wordt de frontsnelheid benaderd door  $U=6,46V^{0,47}$ . Evenals in [2] wordt voor de grotere volumes overgestapt op een tweede formule, omdat de frontsnelheid hier niet meer toeneemt met dezelfde machtsfunctie, maar veel minder. Voor volume groter dan  $1,25 \text{ m}^3/\text{m}$  is in lijn met de vakken 12-13 en 13-14 uitgegaan van een vlakkere formule  $U=7V^{0,1}$ , waarvan het resultaat is weergegeven in Figuur 6.4. De fit parameters zijn samengevat in Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Fit-parameters locatie 1 strook 1a

Fit-parameters	vak 4-5	vak 14-15
a	4,82	6,46
b	0,23	0,47
knip ( $\text{m}^3/\text{m}$ )	-	1,25
a	-	7,0
b	-	0,1

## C.2 Locatie 1-1b WOS

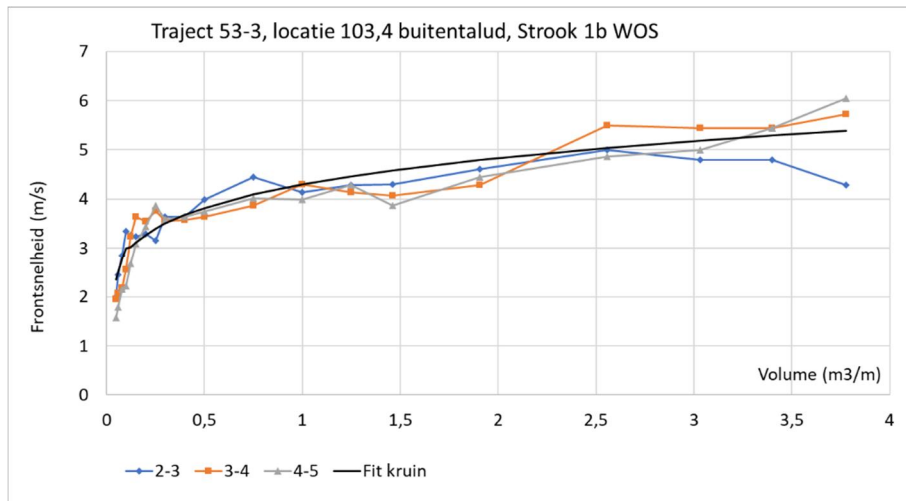
Het dwarsprofiel ligt naast locatie 1a. De proef is uitgevoerd met de golfoverslagsimulator (WOS). Het maaiveld is lokaal ingemeten en uit het AHN gehaald. De kruin is circa 5 m breed en voorzien van een asfaltweg. Het lokaal steilste stukje talud is 1:3,6, gemiddeld is de helling 1:3,9 (Figuur 6.5). Aan het einde van de proef trad schade trad op in vak 16, helemaal onderaan het talud.



Figuur 6.5 Dwarsprofiel locatie 1-1b obv AHN en lokaal ingemeten [1]. Schade trad op in vak 1b, aan het einde van de proef.

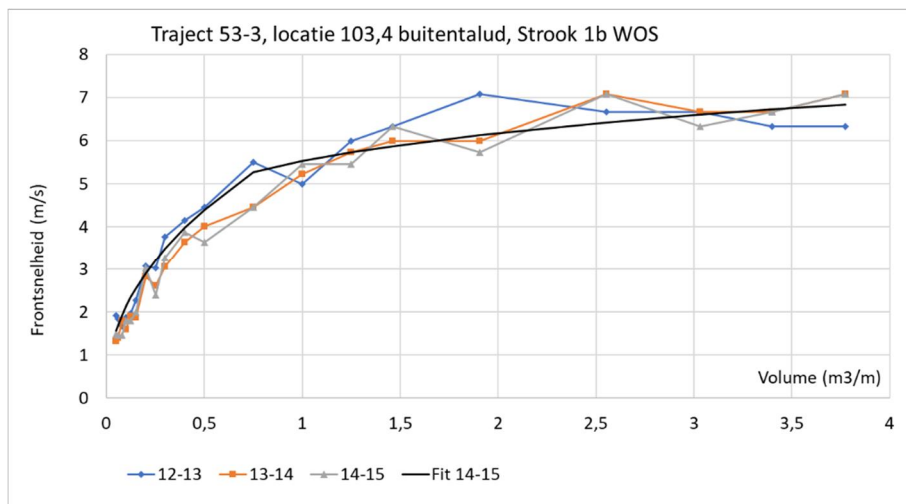
De frontsnelheden zijn geanalyseerd en gerapporteerd in [2]. De frontsnelheden bij de overgang van de kruin naar het talud, op circa 4 m van de uitstroomopening, zijn ongeveer gelijk aan die van de golfploopsimulator. Op het talud zijn de frontsnelheden uit de golfoverslagsimulator echter lager dan die uit de golfploopsimulator. Waarschijnlijk heeft dit

te maken met de vorm van de simulator en het klepmechanisme. De metingen van de frontsnelheden zijn voor diverse plekken langs het talud uitgewerkt in [2]. Deze zijn overgenomen in Tabel 6.3 en Figuur 6.6.



Figuur 6.6 Gemeten frontsnelheden vak 2-3, 3-4 en 4-5 met machtsfunctie-fit uit [2] voor de kruin

Schade trad op in vak 16, onderaan het talud. De metingen voor de onderste drie vakken zijn uitgezet in Figuur 6.7 en hier is een machtsfunctie op gefit. De fitfactoren staan in Tabel 6.3.



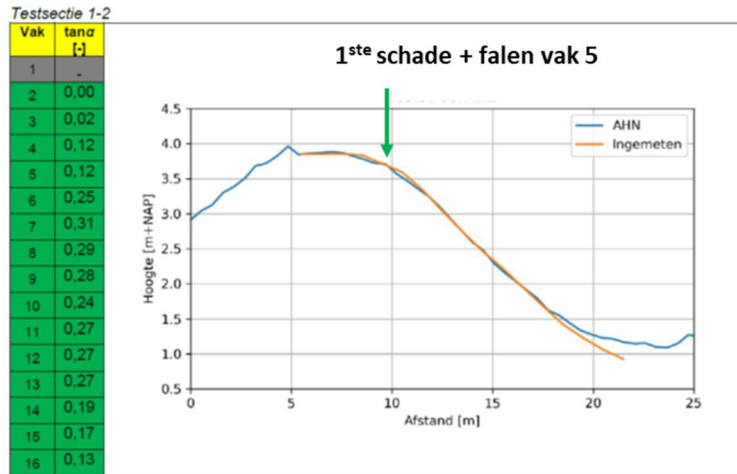
Figuur 6.7 Gemeten frontsnelheden vak 12-13, 13-14 en 14-15 met machtsfunctie-fit

Tabel 6.3 Fit-parameters locate 1 strook 1b (WOS)

Fit-parameters	Kruin [2]	vak 13-15
<b>a</b>	6,7	6,0
<b>b</b>	0,35	0,45
<b>knip (m³/m)</b>	0,1	0,75
<b>a</b>	4,3	5,52
<b>b</b>	0,17	0,16

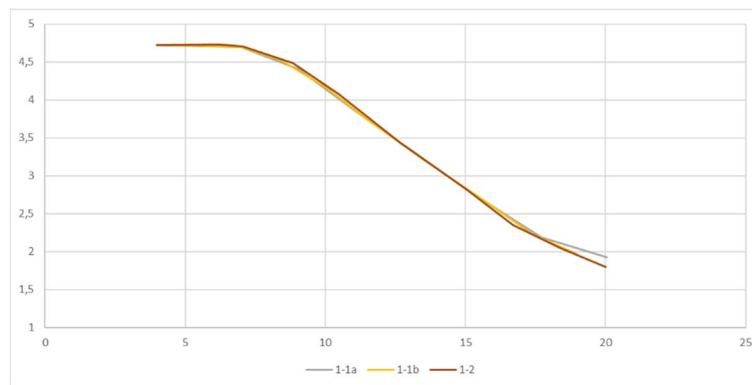
### C.3 Locatie 1-2 RUS

Het dwarsprofiel ligt naast locatie 1a. Het maaiveld is lokaal ingemeten en uit het AHN gehaald. De kruin is circa 5 m breed en voorzien van een asfaltweg. Het lokaal steilste stukje talud is 1:3,2; gemiddeld is de helling 1:3,7 (Figuur 6.8). Aan het einde van de proef met 50 l/s per m bij een golfhoogte van 1 m (GO50\_1,0) trad schade op in vak 5, na 1 uur van de proef 190 l/s per 'm bij een golfhoogte van 1 m (GO190\_1,0) brak de toplaag, ofwel de definitie van falen van de toplaag.



Figuur 6.8 Dwarsprofiel locatie 1-2 obv AHN en lokaal ingemeten [1]. Schade en falen van de grasbekleding ter plaatse van vak 5

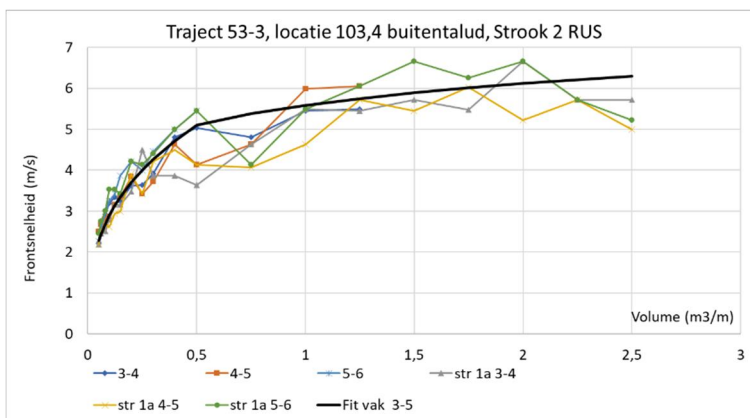
In verband met falen van de toplaag konden geen frontsnelheidsmetingen meer worden uitgevoerd voor de hoogste volumes [1]. Daarom is voor de hogere volumes gebruik gemaakt van de metingen op strook 1-1a, welke direct naast strook 1-2 ligt en een vrijwel gelijke geometrie heeft (Figuur 6.9).



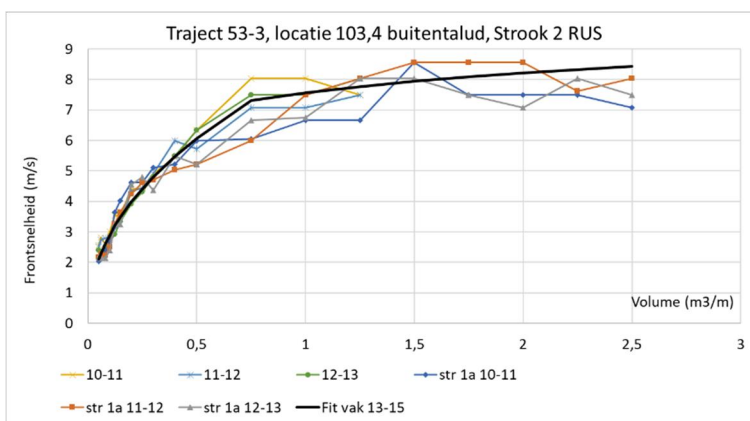
Figuur 6.9 Taludgeometrie locatie 1, strook 1a, 1b en 2

Er is een machtsfunctie gefit voor de metingen rondom vak 4-5 en voor de plek met de hoogste frontsnelheden, vakken 10-11, 11-12 en 12-13. De metingen en de fit staan in Figuur 6.10 en Figuur 6.11. De fitfactoren worden gegeven in Tabel 6.4.





Figuur 6.10 Gemeten frontnelheden vak 3-4, 4-5 en 5-6 met machtsfunctie-fit



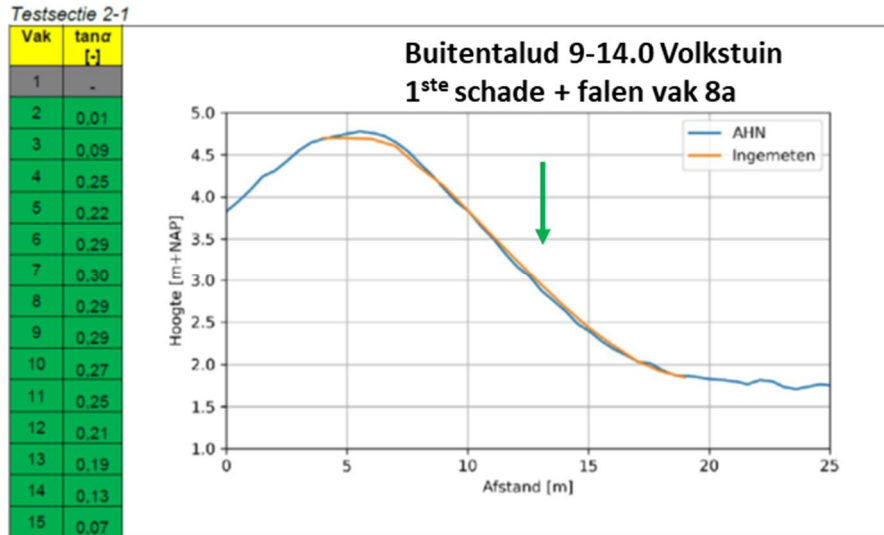
Figuur 6.11 Gemeten frontnelheden vak 10-11, 11-12 en 12-13 met machtsfunctie-fit

Tabel 6.4 Fit-parameters locatie 1 strook 2

Fit-parameters	Kruin [2]	vak 13-15
<b>a</b>	6,5	8,34
<b>b</b>	0,35	0,46
<b>knip (m³/m)</b>	0,5	0,75
<b>a</b>	5,59	7,56
<b>b</b>	0,13	0,12

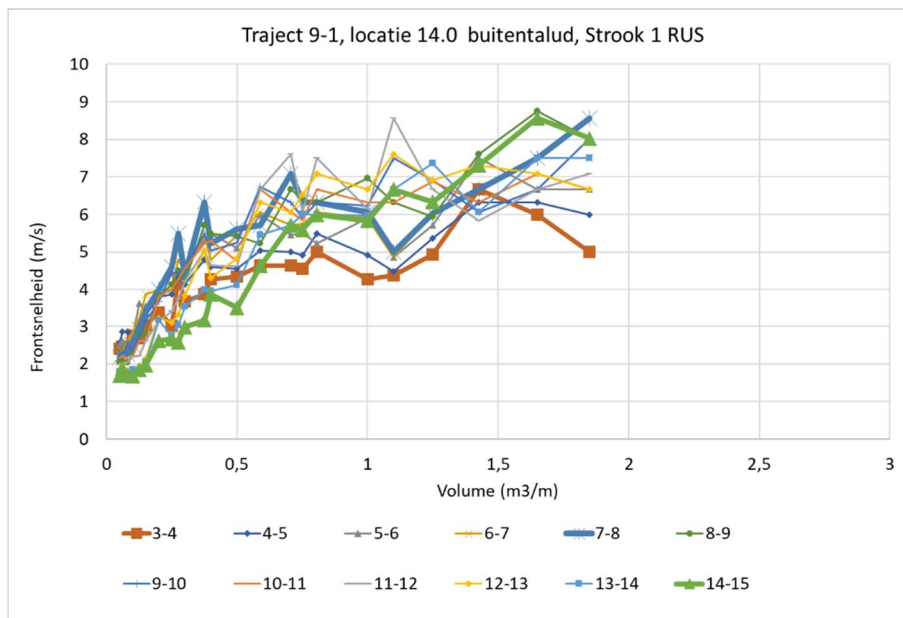
## C.4 Locatie 2 RUS buitentalud 1

Locatie 2 ligt bij de volkstuin Dijktraject 9-1 bij dijkspar 14,0. Zowel het binnen- als het buitentalud zijn beproefd. Het buitentalud betreft strook 1, het buitentalud strook 2. Het maaiveld is lokaal ingemeten en uit het AHN gehaald. De kruin is circa 3 m breed. Het lokaal steilste stukje talud is 1:3,3, gemiddeld is de helling 1:4,1 (Figuur 6.12). Er is schade en falen van de grasbekleding opgetreden ter plaatse van vak 8.



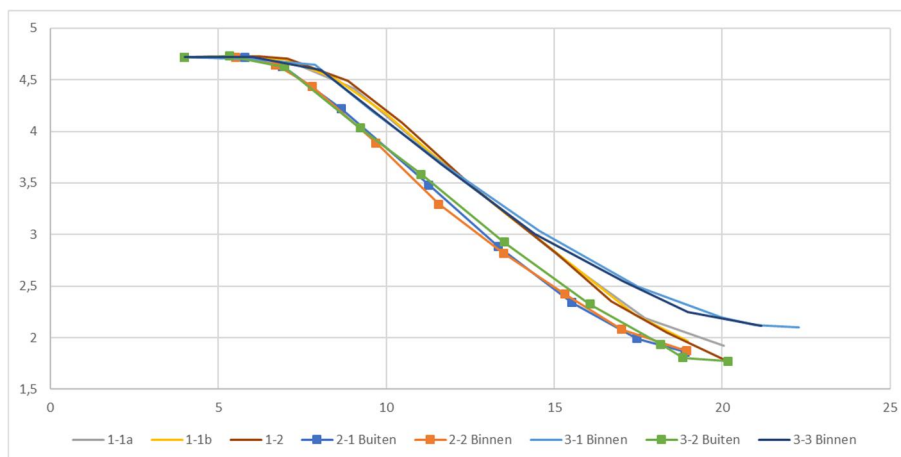
Figuur 6.12 Dwarsprofiel locatie 2-1 obv AHN en lokaal ingemeten [1]. Schade en falen van de grasbekleding ter plaatse van vak 8a.

De hydraulische metingen op deze strook zijn beperkt tot een maximaal volume van  $1,85 \text{ m}^3/\text{m}$  (zie [1]). De metingen zijn per vak en volume weergegeven in Figuur 6.13.



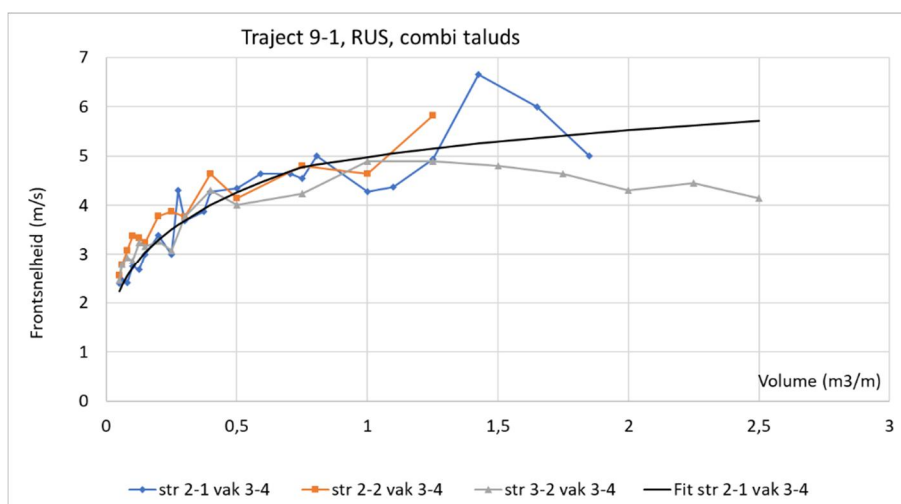
Figuur 6.13 Gemeten frontsnelheden tegen volume op verschillende afstanden van de uitstroomopening van de simulator (3-4 m tot en met 14-15 m)

Voor de schatting van de frontsnelheid voor grotere volumes is gekeken naar vergelijkbare taluds, waar wel metingen beschikbaar zijn. Bij een gelijke geometrie vanuit de uitstroomopening zal verder vooral de ruwheid van het talud nog van invloed zijn op de ontwikkeling van de frontsnelheden. De taluds zijn op elkaar gelegd, waarbij het ijkpunt de positie van de uitstroomopening is. De taluds zijn weergegeven in Figuur 6.14.

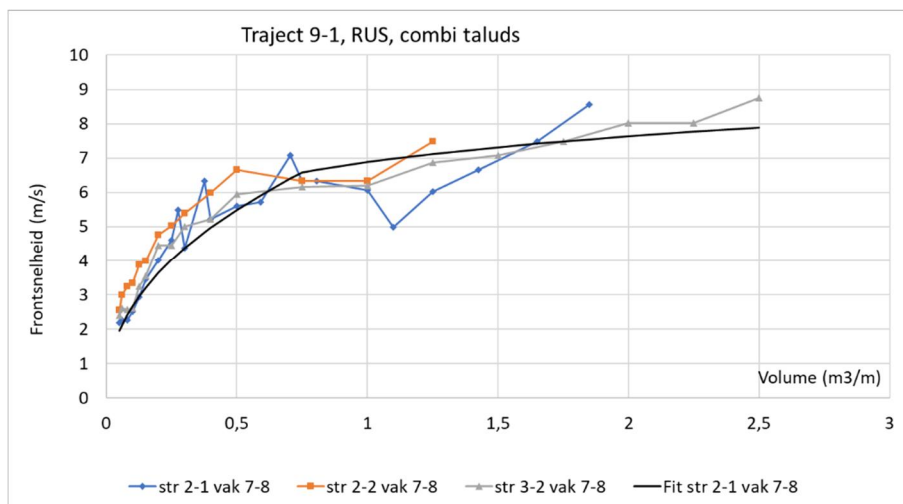


Figuur 6.14 Vergelijking taludgeometrie proefstroken

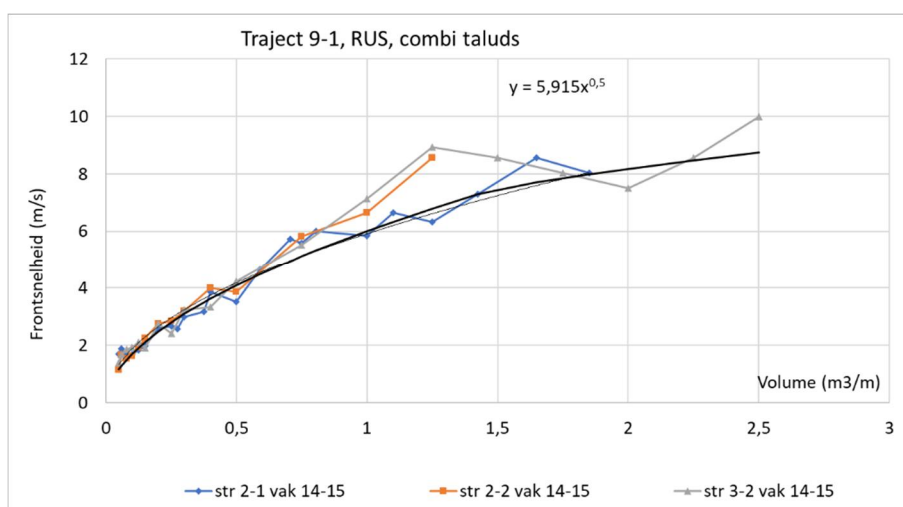
Vergelijkbaar met strook 2-1 zijn 2-2 en 3-2, zoals aangegeven met markers in de bovenstaande figuur. Zowel de helling als de breedte van de kruin vanaf de uitstroomopening komen goed overeen. Voor strook 2-2 zijn metingen beschikbaar tot een volume van 1,25 m<sup>3</sup>/m en voor strook 3-2 tot 2,5 m<sup>3</sup>/m. Voor de vakken 3-4 (kruin), 7-8 (talud, shade en falen) en 14-15 (teen) zijn de beschikbare metingen uitgezet in een grafiek en zijn machtsverhouding op het oog gefit. Hierbij zijn de metingen op strook 2-1 als leidend genomen en is boven een volume van 1,85 m<sup>3</sup>/m gekeken naar de frontsnelheden die beschikbaar zijn op strook 3-2. De resultaten staan in Figuur 6.15, Figuur 6.16 en Figuur 6.17. De fitfactoren staan in Tabel 6.5.



Figuur 6.15 Gemeten frontsnelheden tegen volume voor vak 3-4 m, strook 2-2, 2-1 en 3-2 met machtsfunctie-fit.



Figuur 6.16 Gemeten frontnelheden tegen volume voor vak 7-8 m, strook 2-2, 2-1 en 3-2 met machtsfunctie-fit



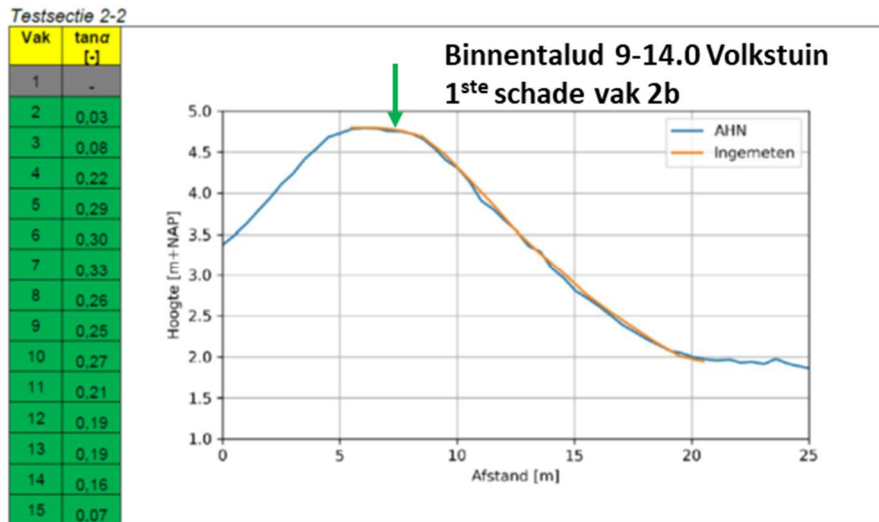
Figuur 6.17 Gemeten frontnelheden tegen volume voor vak 14-15 m, strook 2-2, 2-1 en 3-2 met machtsfunctie-fit

Tabel 6.5 Fit-parameters locate 2 strook 1

	vak 3-4 (kruin)	vak 7-8	vak 14-15
a	5,17	7,5	6
b	0,28	0,45	0,55
knip (m <sup>3</sup> /m)	0,75	0,75	1,5
a	4,98	6,88	6,64
b	0,15	0,15	0,3

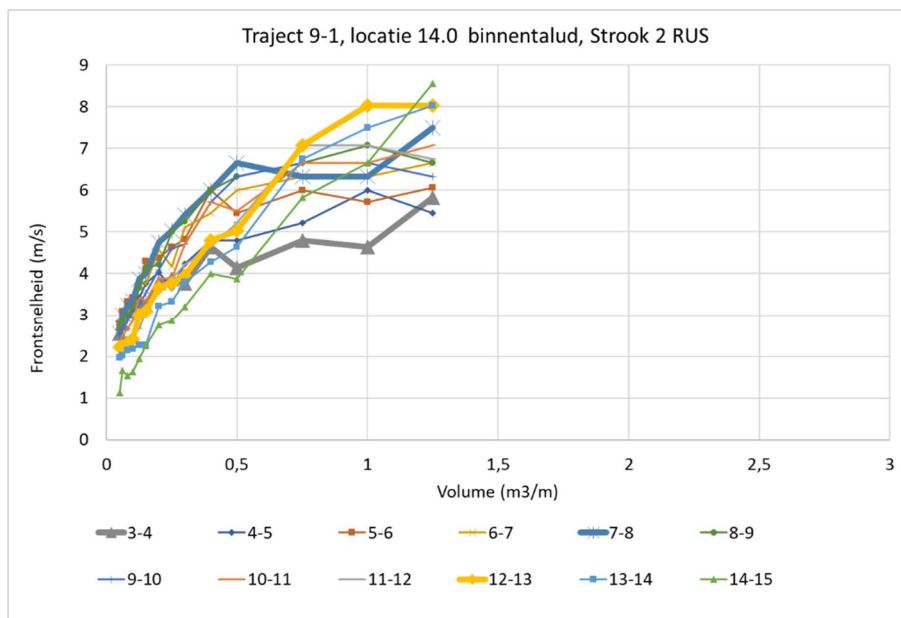
## C.5 Locatie 2 RUS binnentalud 2

Locatie 2 ligt bij de volkstuin Dijktraject 9-1 bij dijkspar 14,0. Zowel het binnen- als het buitentalud zijn beproefd. Strook 2 betreft het binnentalud. Het maaiveld is lokaal ingemeten en uit het AHN gehaald. De kruin is circa 3 m breed. Het lokaal steilste stukje talud is 1:3,0; gemiddeld is de helling 1:4,1 (Figuur 6.18). Er is schade opgetreden ter plaatse van de kruin vak 2, vlakbij de uitstroomopening.



Figuur 6.18 Dwarsprofiel locatie 2-2 obv AHN en lokaal ingemeten [1]. Schade ter plaatse van de kruin.

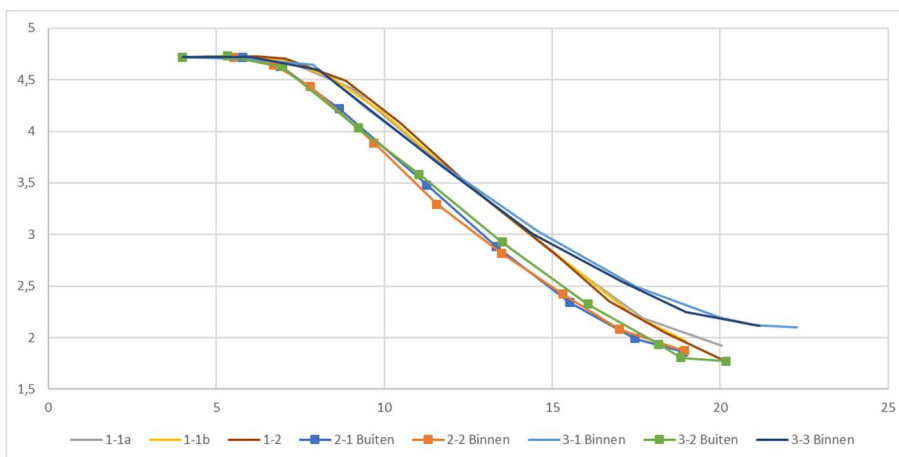
De hydraulische metingen op deze strook zijn beperkt tot een maximaal volume van 1,25 m<sup>3</sup>/m (zie [1]). De metingen zijn per vak en volume weergegeven in Figuur 6.19.



Figuur 6.19 Gemeten frontsnelheden tegen volume op verschillende afstanden van de uitstroomopening van de simulator (3-4 m tot en met 14-15 m)

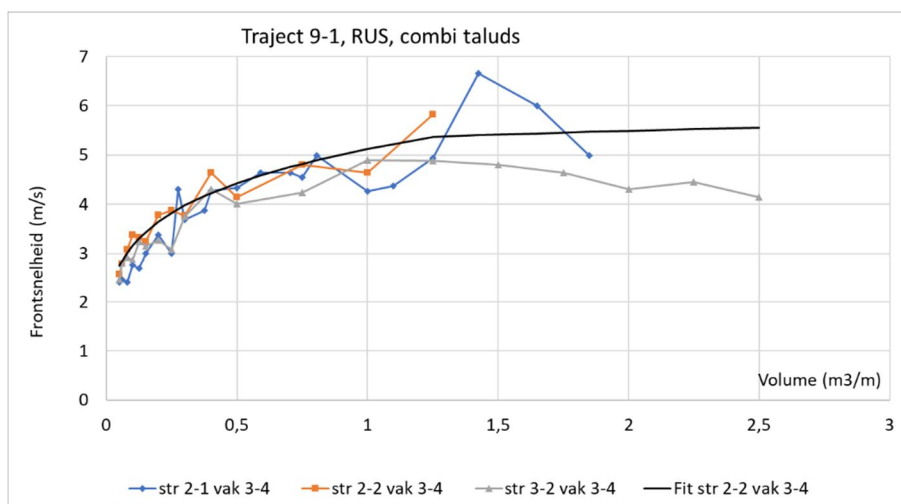
Voor de schatting van de frontsnelheid voor grotere volumes is gekeken naar vergelijkbare taluds, waar wel metingen beschikbaar zijn. Bij een gelijke geometrie vanuit de uitstroomopening zal verder vooral de ruwheid van het talud nog van invloed zijn op de ontwikkeling van de frontsnelheden. De taluds zijn op elkaar gelegd, waarbij het ijkpunt de positie van de uitstroomopening is. De taluds zijn weergegeven in Figuur 6.20.



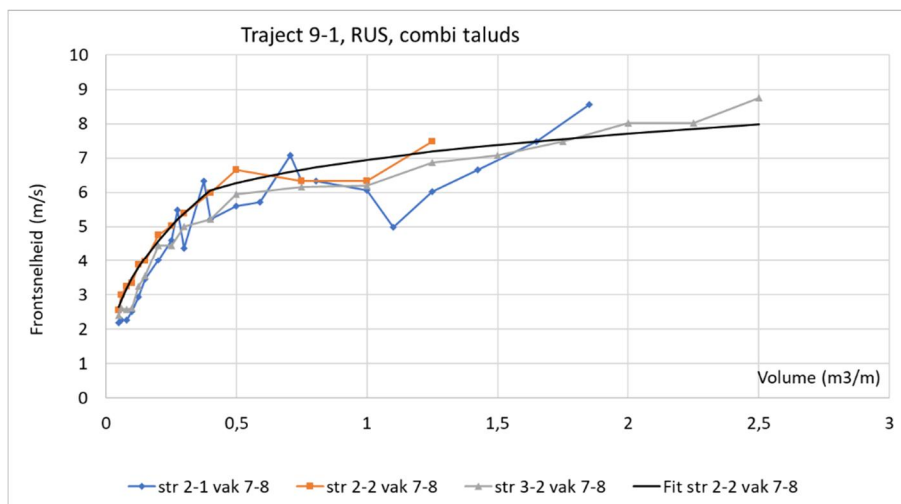


Figuur 6.20 Vergelijking taludgeometrie proefstroken

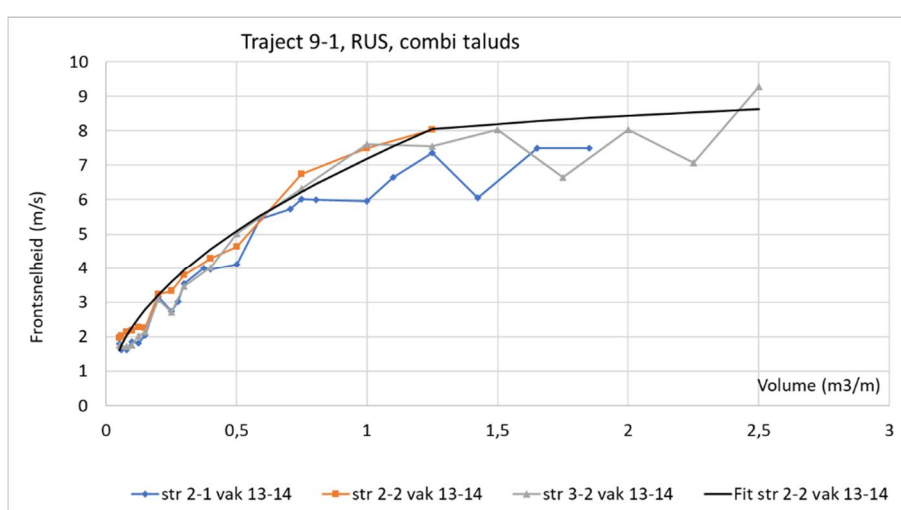
Vergelijkbaar met strook 2-2 zijn 2-1 en 3-2, zoals aangegeven met markers in de bovenstaande figuur. Zowel de helling als de breedte van de kruin vanaf de uitstroomopening komen goed overeen. Voor strook 2-1 zijn metingen beschikbaar tot een volume van 1,85 m<sup>3</sup>/m en voor strook 3-2 tot 2,5 m<sup>3</sup>/m. Voor de vakken 3-4 (kruin), 7-8 (talud) en 13-14 (teen) zijn de beschikbare metingen uitgezet in een grafiek en zijn machtsverhouding op het oog gefit. Hierbij zijn de metingen op strook 2-2 als leidend genomen en is boven een volume van 1,25 m<sup>3</sup>/m gekeken naar de frontsnelheden die beschikbaar zijn op strook 2-1 en 3-2. De resultaten staan in Figuur 6.21, Figuur 6.22 en Figuur 6.23. De fitfactoren staan in Tabel 6.6.



Figuur 6.21 Gemeten frontsnelheden tegen volume voor vak 3-4 m, strook 2-2, 2-1 en 3-2 met machtsfunctiefit



Figuur 6.22 Gemeten frontnelheden tegen volume voor vak 7-8 m, strook 2-2, 2-1 en 3-2 met machtsfunctie-fit



Figuur 6.23 Gemeten frontnelheden tegen volume voor vak 13-14 m, strook 2-2, 2-1 en 3-2 met machtsfunctie-fit

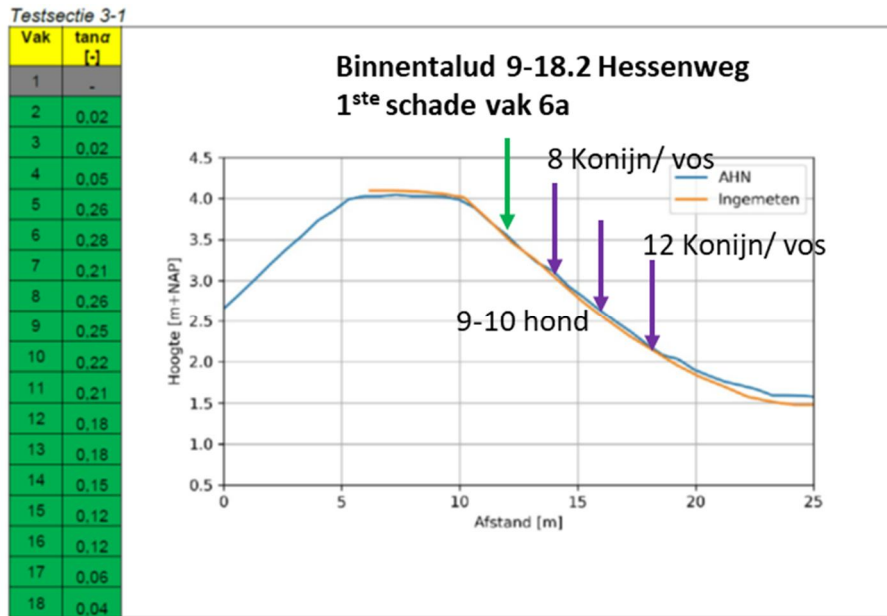
Tabel 6.6 Fit-parameters locate 2 strook 2

	vak 3-4 (kruin)	vak 7-8	vak 13-14
a	5,12	8,74	7,3
b	0,21	0,4	0,55
knip (m³/m)	1,25	0,4	1,25
a	5,31	6,95	8,07
b	0,05	0,15	0,1

## C.6 Locatie 3 RUS binnentalud strook 1

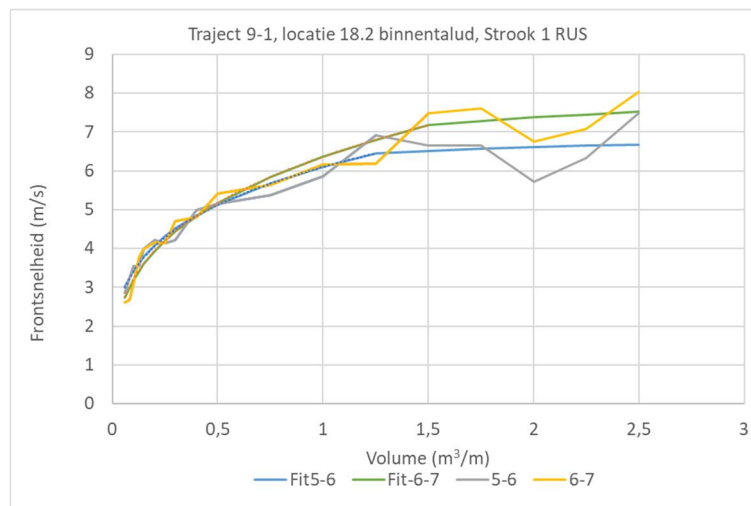
Locatie 3 ligt langs de Hessenweg traject 9-1 bij dijkpaar 18,2. Zowel het binnen- als het buitentalud zijn beproefd, strook 1 betreft het binnentalud. Het maaiveld is lokaal ingemeten en uit het AHN gehaald. De kruin is circa 5 m breed en voorzien van betonnen doorgroeistenen. Het lokaal steilste stukje talud is 1:3,6, gemiddeld is de helling 1:4,4 (Figuur 6.24). Schade trad op in vak 6a, een klein stukje over de kruin. De schade is daarna iets ontwikkeld tot in vak 7 aan het einde van de proef. Er was geen falen.

Na afronding van de reguliere proef zijn schades aangebracht in vakken 8a en 12b (konijnenhol 7,5 cm), 8b en 12 a (vossenhol 15 cm) en in het midden van de strook vak 9-10 een hondenschade (60x35x24 cm; strookrichting x breedte x diepte) (Figuur 6.24).



Figuur 6.24 Dwarsprofiel locatie 3-1 obv AHN en lokaal ingemeten [1] met de plaatsen van eerste schade in (m) ten opzichte van de uitstroopening van de simulator en na de reguliere proef aangebrachte schades (paarse peilen bij 8, 9-10 en 12)

De gemeten frontsnelheden rondom vak 6, daar waar de eerste schade ontstond, staan in Figuur 6.25. De frontsnelheid per volume neemt nog iets toe op dit gedeelte van het talud. Vanaf een volume van 1 à 1,5 m<sup>3</sup>/m neemt de toename van de frontsnelheid tegen volume minder snel toe. Daarom is in de benaderende functie een knip gelegd bij 1,25 respectievelijk 1,5 m<sup>3</sup>/m voor vak 5-6 en 6-7. De volumes onder en boven deze knip hebben elk een eigen fit.



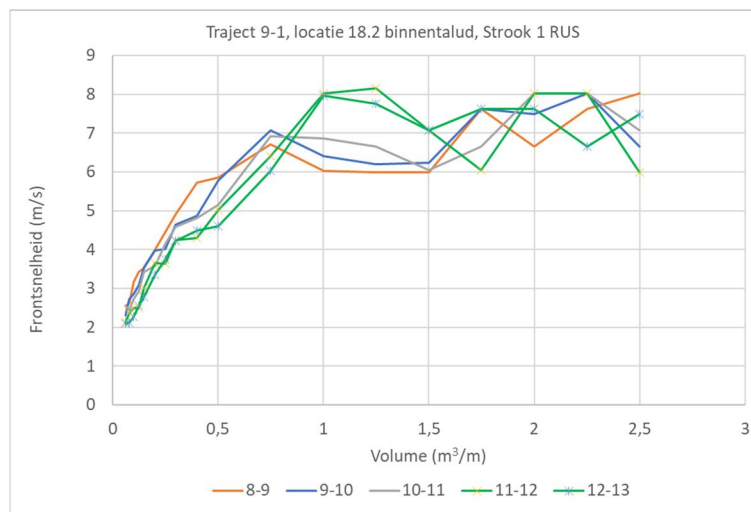
Figuur 6.25 Gemeten frontsnelheden vak 5-6 en 6-7 met machtsfunctie-fit

De maximale frontsnelheden worden gemeten in vak 14-15, onderaan het talud. Ook voor de metingen in dit vak is een fit uitgevoerd. De samenvatting van de fit-parameters staan in Tabel 6.7.

Tabel 6.7 Fit-parameters locatie 3 strook 1

	vak 5-6	vak 6-7	vak 14-15
<b>a</b>	6,1	6,36	6,47
<b>b</b>	0,25	0,3	0,51
<b>knip (m<sup>3</sup>/m)</b>	1,25	1,5	1,25
<b>a</b>	6,38	6,93	6,63
<b>b</b>	0,05	0,09	0,40

Na de reguliere proef zijn schades aangebracht tussen 8 en 12 m van de uitstroomopening van de simulator. De frontsnelheden van de vakken 8-9, 9-10 en 10-11 verschillen niet veel van elkaar. Voor deze vakken wordt één fit gebruikt. Hetzelfde geldt voor de vakken 11-12 en 12-13 (zie Figuur 6.26)

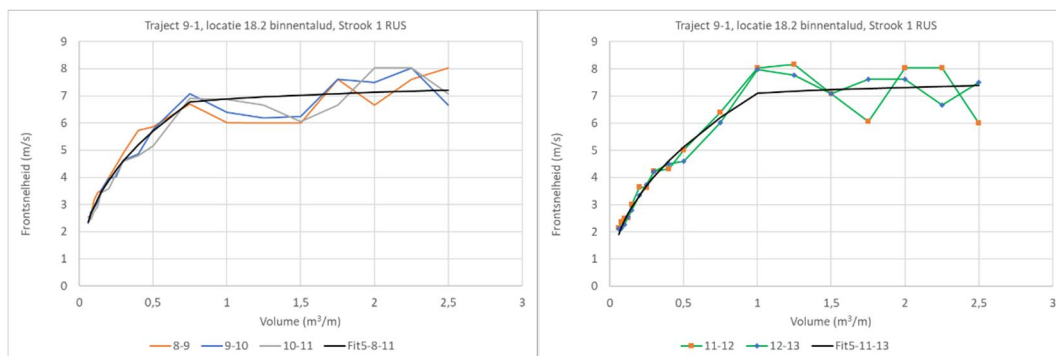


Figuur 6.26 Meting frontsnelheden (m/s) vakken 8-9 tot en met 12-13 locatie 3, strook 1

De samenvatting van fit-parameters voor de vakken 8-9, 9-10 en 10-11 en die voor 11-12 en 12-13 voor terugrekenen van de belasting op de aangebrachte schades na de reguliere proef staan in Tabel 6.8. De fits en de metingen staan in Figuur 6.27.

Tabel 6.8 Fit-parameters locatie 3 strook 1 –bij aangebrachte schades

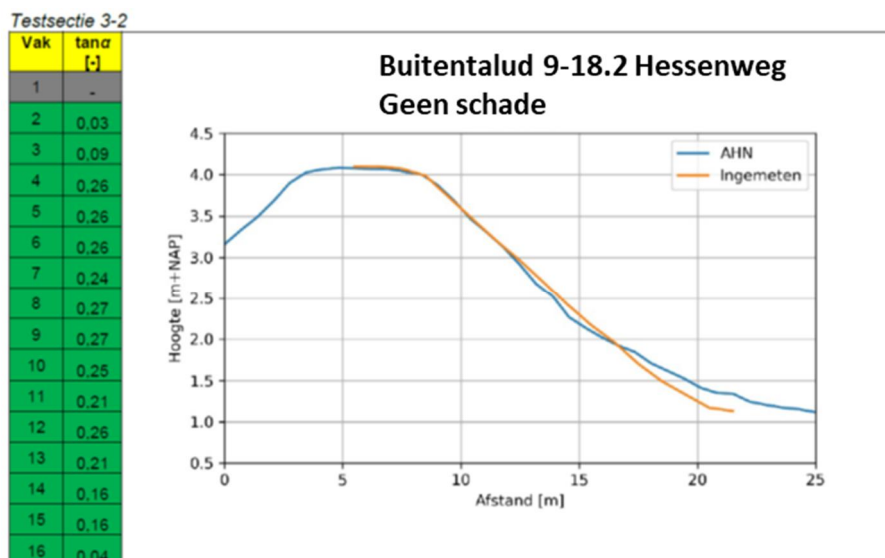
	vak 8-9/9-10/10-11	vak 11-12/12-13
<b>a</b>	7,65	7,1
<b>b</b>	0,42	0,47
<b>knip (m<sup>3</sup>/m)</b>	0,75	1
<b>a</b>	6,88	7,10
<b>b</b>	0,05	0,04



Figuur 6.27 Meting frontsnellheden (m/s) vakken 8-9 tot en met 10-11 met fit (links) en de vakken 11-12 en 12-13 (rechts)

## C.7 Locatie 3 RUS buitentalud strook 2

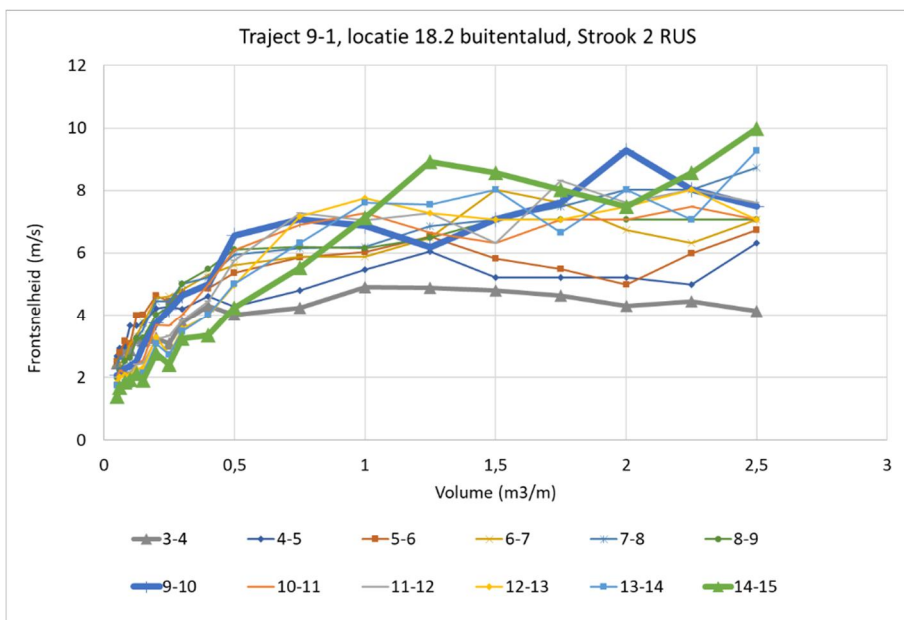
Locatie 3 ligt langs de Hessenweg traject 9-1 bij dijkpaar 18,2. Zowel het binnen- als het buitentalud zijn beproefd, strook 2 betreft het buitentalud. Het maaiveld is lokaal ingemeten en uit het AHN gehaald. De kruin is circa 5 m breed en voorzien van betonnen doorgroeiëstenen. Het lokaal steilste stukje talud is 1:3,7, gemiddeld is de helling 1:4,0 (Figuur 6.28). Er is geen schade opgetreden die is geclassificeerd als 'eerste schade'. Er is enkel enige slijtage opgetreden. Op de kruin, vlak bij de uitstroomopening zijn de betonnen doorgroeiëstenen zichtbaar geworden.



Figuur 6.28 Dwarsprofiel locatie 3-2 obv AHN en lokaal ingemeten [1]

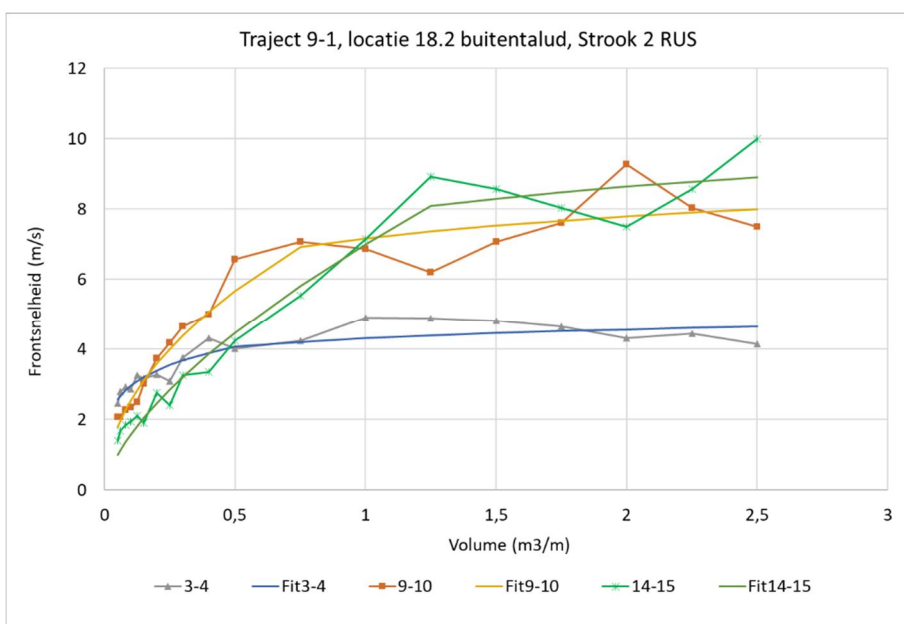
Voor het terugrekenen van de minimaal aanwezige  $U_c$  op de kruin en op het talud zijn fit functies gemaakt voor de vakken 3-4, karakteristiek voor de belasting op de kruin, vak 9-10 waar hoge frontsnellheden worden gemeten bij wat kleinere volumes (tot  $1 \text{ m}^3/\text{m}$ ) en vak 14-15 waar de hoogste frontsnellheden zijn gemeten, maar alleen voor de grootste volumes (meer dan  $1 \text{ m}^3/\text{m}$ ). Alle metingen staan in Figuur 6.29. De vakken 3-4, 9-10 en 14-15 zijn met een extra dikke lijn weergegeven in de grafiek.





Figuur 6.29 Gemeten frontsnelheden tegen volume op verschillende afstanden van de uitstroomopening van de simulator (3-4 m tot en met 14-15 m)

De fitfuncties voor de metingen in de vakken 3-4, 9-10 en 14-15 staan in Figuur 6.30. De fit parameters staan in Tabel 6.9.



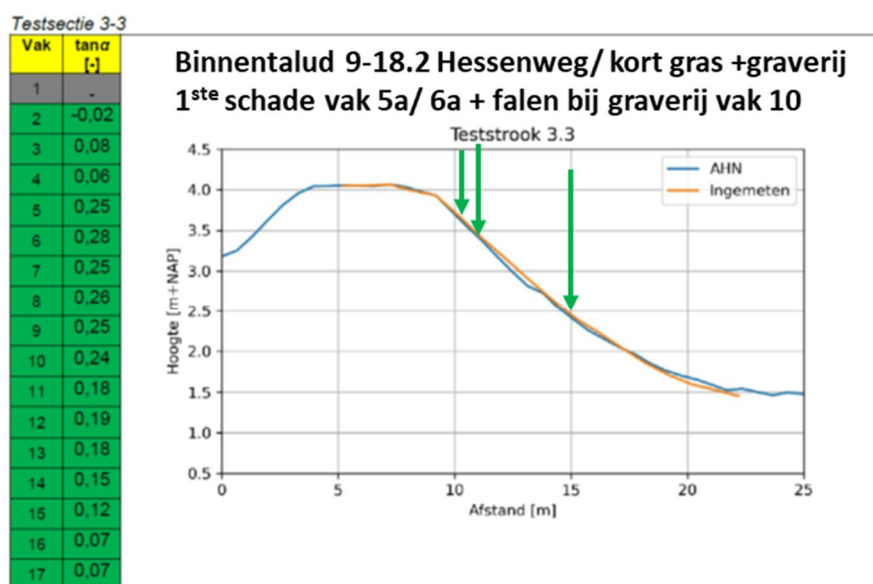
Figuur 6.30 Gemeten frontsnelheden tegen volume op verschillende afstanden van de uitstroomopening van de simulator (3-4 m, 9-10 en 14-15 m) met de machtsfunctie-fits

Tabel 6.9 Fit-parameters locatie 3 strook 2

	vak 3-4 (kruin)	vak 9-10	vak 14-15
a	4,67	8	7
b	0,2	0,5	0,65
knip (m <sup>3</sup> /m)	0,5	0,75	1,25
a	4,30	7,17	7,85
b	0,08	0,12	0,14

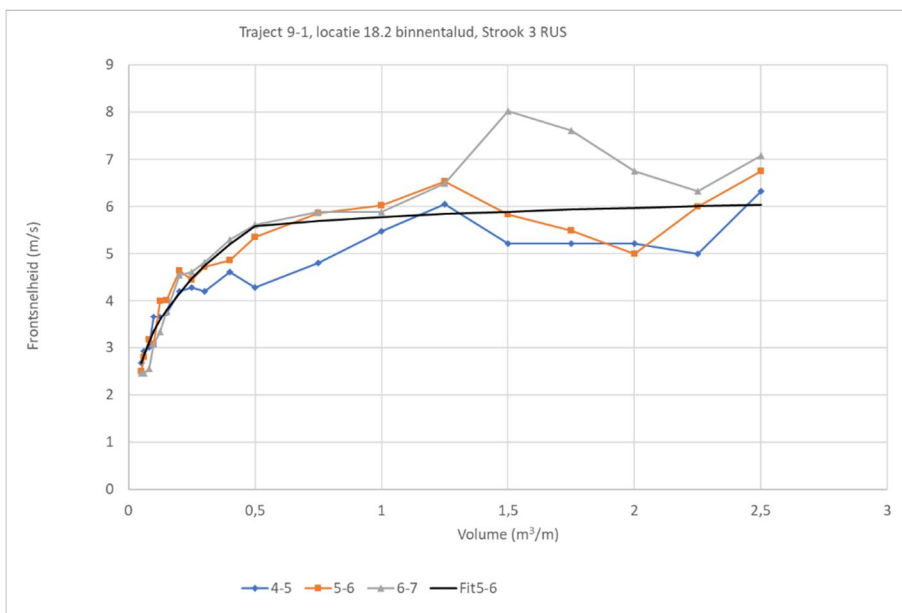
## C.8 Locatie 3 RUS binnentalud strook 3

Strook 3 op locatie 3 is gelegen direct naast strook 1. Het maaiveld is lokaal ingemeten en uit het AHN gehaald. De kruin is circa 5 m breed en voorzien van betonnen doorgroeistenen (onzichtbaar onder de grasbekleding aanwezig). Het lokaal steilste stukje talud is 1:3,6, gemiddeld is de helling 1:4,3 (Figuur 6.31). Schade trad op in vak 5 en 6, een klein stukje over de kruin. De schade heeft zich daarna stroomafwaarts uitgebreid. Falen trad op ter plaatse van de op voorhand aangebrachte schade bij vak 10.



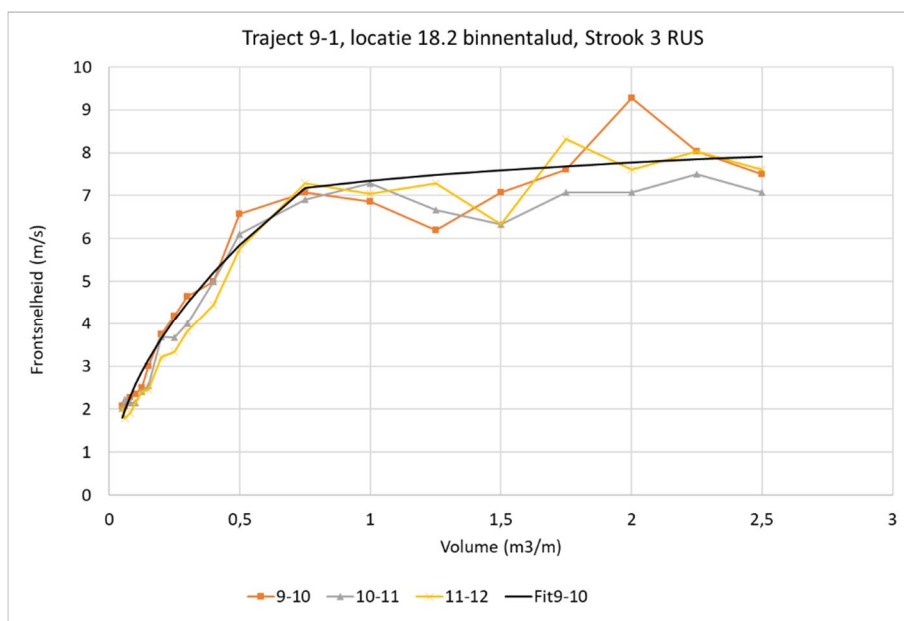
Figuur 6.31 Dwarsprofiel locatie 3-3 obv AHN en lokaal ingemeten [1] met de plaatsen van eerste schade in (m) ten opzichte van de uitstroomopening van de simulator (vak 5 -6) en falen bij de aangebrachte schades (vak 10)

De gemeten frontsnelheden rondom vak 5-6, daar waar de eerste schade ontstond, staan in Figuur 6.32. De frontsnelheid, gegeven een bepaald volume, neemt op dit taluddeel nog toe met toenemende afstand tot de uitstroomopening. Vanaf een volume van circa 0,5 m<sup>3</sup>/m neemt de toename van de frontsnelheid tegen volume minder snel toe. Daarom is in de benaderende functie voor vak 5-6 een knip gelegd bij 0,5 m<sup>3</sup>/m. De volumes onder en boven deze knip hebben elk een eigen fit.



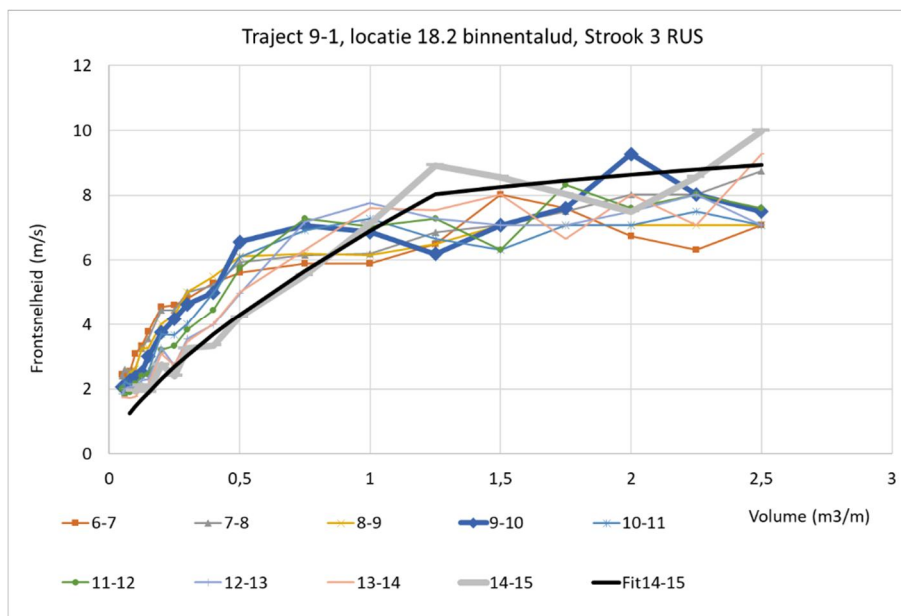
Figuur 6.32 Gemeten frontsnelheden vak 4-5, 5-6 en 6-7 met machtsfunctie-fit voor vak 5-6

Falen van de grasbekleding trad op bij vak 10, ter plaatse van de aangebrachte graafschade. De gemeten frontsnelheden en de machtsfunctiefit voor deze plek staan in Figuur 6.33.



Figuur 6.33 Gemeten frontsnelheden vak 9-10, 10-11 en 11-12 met machtsfunctie-fit voor vak 9-10.

Om de plek met de hoogste belasting te bepalen zijn de metingen voor de vakken 6-7 tot en met 14-15 uitgezet in Figuur 6.34.



Figuur 6.34 Gemeten frontsnelheden tegen volume op verschillende afstanden van de uitstroomopening van de simulator (6-7 m tot en met 14-15 m) en machtsfunctie-fit voor vak 14-15

De maximale frontsnelheid wordt onderaan het talud gemeten in vak 14-15 bij het grootste volume van  $2,5 \text{ m}^3/\text{m}$  (dikke grijze lijn in bovenstaande grafiek). Het grootste volume in de reguliere stuurlijst van de gesimuleerde stormcondities is circa ruim  $2,2 \text{ m}^3/\text{m}$ . De kleinere volumes van  $0,3$  à  $1 \text{ m}^3/\text{m}$  geven in vak 14-15 echter lagere frontsnelheden dan op de plekken hoger op het talud. Omdat er veel meer kleine volumes over het talud stromen ten opzichte van grote volumes staat niet op voorhand vast op welke plek de belasting het hoogst is geweest. De fits voor 9-10 en 14-15, worden beide gegeven, op basis daarvan kan worden gekeken waar de belasting waarschijnlijk het hoogste is geweest (Tabel 6.10).

Tabel 6.10 Fit-parameters locate 3 strook 3

	vak 5-6	vak 9-10	vak 14-15
<b>a</b>	6,98	8,31	6,9
<b>b</b>	0,32	0,51	0,68
<b>knip (<math>\text{m}^3/\text{m}</math>)</b>	0,5	0,75	1,25
<b>a</b>	5,78	7,34	7,76
<b>b</b>	0,05	0,08	0,15

## D Risicogestuurd beheer en onderhoud



## Memo

**Datum**

1 juli 2021

**Contactpersoon**

Wouter Jan Klerk

**Doorkiesnummer**

+31(0)88 335 8390

**E-mail**

WouterJan.Klerk@deltares.nl

**Aantal pagina's**

1 van 19

**Onderwerp**

Risicogestuurd beheer en onderhoud gras op zanddijken

## 1 Inleiding

De sterkte van gras op zanddijken wordt beïnvloedt door keuzes in het beheer en onderhoud. De grasbekleding op de Vechtdijken is over grote stukken van behoorlijke kwaliteit, en ook beter dan in het verleden. Tegelijkertijd blijkt het op sommige punten lastig om de kwaliteit van het gras te verbeteren. Echter, ook op goede stukken kunnen schades ontstaan door bijvoorbeeld graverij, wat een veiligheidsprobleem kan vormen. Daarom is risicogestuurd beheer en onderhoud een belangrijk middel om te borgen dat de beheerder in control is. Opgemerkt moet worden dat het ontstaan van schade door bijvoorbeeld graverij niet te voorkomen is, maar dat het er primair om gaat om de invloed op het functioneren van de dijk 'als het er echt toe doet' te minimaliseren.

In dit memo kijken we naar welke schades voor (kunnen) komen langs de Vecht, welke gevolgen dit heeft voor de veiligheid van de kering, en wat handelingsperspectieven zijn voor de beheerder om hier mee om te gaan. We kijken daarbij zowel naar mogelijke verbeteringen in B&O, in crisismanagement en naar de invloed van eventuele toekomstige ontwerpkeuzes bij versterking van de Vechtdijken.

Een belangrijk uitgangspunt in deze analyse is de faaldefinitie van de kering. Omdat we in Nederland overstromingskansen hanteren kan er vaak veel reststerkte worden meegenomen. In de relevantiestudie (P2) is daarom verkend wat de restprofielbenadering oplevert voor de Vechtdijken. Dit bleek potentieel een significante bijdrage te leveren, maar er zitten ook enkele haken en ogen aan, zowel praktisch als inhoudelijk. In dit memo wordt als faaldefinitie gehanteerd het falen van de grasbekleding (toplaag), en wordt erosieweerstand van het zandlichaam niet meegenomen. De keuze voor te hanteren faaldefinitie heeft echter behoorlijke consequenties voor het handelingsperspectief, daar gaan we later in dit memo nader op in.

In Hoofdstuk 2 gaan we nader in op de soorten schades en de frequentie waarmee deze optreden. In Hoofdstuk 3 beschouwen we op basis van de proeven langs de Vecht en elders wat de invloed van schade is op het faalgedrag van de grasbekleding. In Hoofdstuk 4 wordt het handelingsperspectief geschetst, en in Hoofdstuk 5 samengevat.

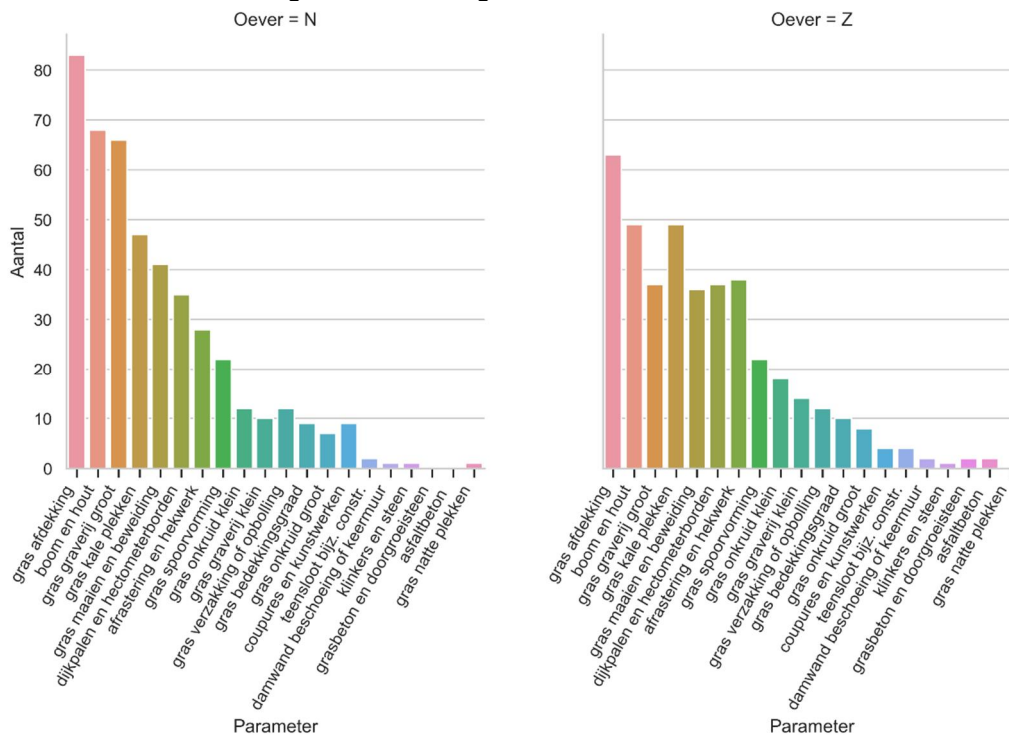
## 2 Welke schades komen voor?

Het voorkomen van schade aan de bekleding komt door een groot aantal mechanismen. Niet elke schade ontstaat op dezelfde manier, en vaak wordt onderscheid gemaakt tussen schades die optreden als gevolg van een 'shock-based' proces (dus incidenteel, op een willekeurig moment en plaats) en als gevolg van een continu proces (schades die langzaam verergeren). Een voorbeeld van het eerste soort schade is dierlijke graverij, het tweede is bijvoorbeeld langzame afname van de bedekkingsgraad door schrale grond of droogte. Uiteraard verschilt per continue proces de tijdschaal (bijv. corrosie van staal duurt jaren, terwijl de bedekkingsgraad bij droogte in een zomer af kan nemen), vaak ook afhankelijk van de precieze omstandigheden.

In onderstaande figuur (uit rapport P2) is weergegeven voor beide Vechtoevers welke schades in de inspecties tussen 2016 en 2020 zijn gemeld. Zowel in het veld als in de proeven zijn globaal gezien 2 soorten schade aan de grasmat meegenomen:

- Schades in de vorm van een slechte bedekking
- Schades in de vorm van een 'gat'.

Beide soorten worden in de volgende subparagrafen kort besproken. In de laatste paragraaf wordt een overzicht gegeven van de voor de Vechtdijken relevante situaties waarin de dijk kan verkeren aan het begin van een hoogwater.



Figuur 2-1 Aantallen meldingen per hoofdparameter. Links voor 9-1, Rechts voor 53-3.

### 2.1 Slechte bedekking

Slechte bedekking kan ontstaan doordat de worteldichtheid van het gras wordt aangetast. Een belangrijke factor hiervoor is droogteschade, dit is in 2018 op vrij grote schaal waargenomen. Om in te schatten wat de potentiële toekomstige gevolgen hiervan kunnen zijn, kijken we eerst naar de kans dat een dergelijke droge periode voorkomt. Landelijk gezien was de kans op de droogte van 2018 ongeveer 1/30 jaar (zie [1]), maar dit varieert sterk over het hele land gezien. Zo was de Achterhoek extreem droog (1/100 jaar), maar de Veluwe juist iets minder droog (1/20 jaar). Het gedeelte waarin de Vechtdijken zich bevinden komt qua neerslagtekort meer overeen met de Veluwe [2]. Hoewel er veel onzekerheid is m.b.t. de

ontwikkeling van droogte in de toekomst is het algemene beeld dat het westen van Nederland natter wordt, en het oosten van Nederland droger. De kans op droogte zal dus in de toekomst waarschijnlijk nog wat toenemen. Wanneer we als levensduur van een dijk 50 jaar aannemen ligt het dus in de verwachting dat er pakweg 2x een droogte voorkomt met een intensiteit vergelijkbaar aan die van 2018 (of groter).

Uit de analyses en gesprekken met de beheerder (zie bijlage A en de bijlage bij het B&O gedeelte in het P2 rapport) blijkt dat er sprake is van een schrale bodem op de Vechtdijken door het jarenlange maai- en afvoerbeleid. Naast droogte is dit een belangrijke factor voor het ontstaan van bekledingen met een lagere bedekkingsgraad. Dit is een proces wat al enige jaren gaande is. Andere factoren (bijv. engerlingen) laten we verder buiten beschouwing in deze analyse, maar het globale effect is vergelijkbaar.

Afdekking is een schadesoort die veelvuldig voorkomt, en die op termijn ook voor een slechte bedekkingsgraad kan zorgen. Tijdens de overslagproeven is ook een taluddeel wat 3 maanden afgedekt is geweest beproefd, hier was geen merkbaar effect op de erosiebestendigheid. De hypothese is derhalve dat afdekking weinig effect heeft op de sterkte, tenzij de afdekking zeer lang aanwezig is.

## 2.2 Gatschades

De meeste gatschades worden veroorzaakt door dierlijke graverij, waarbij met name konijnen en honden veelvuldig voorkomen langs de Vecht. Uit de golfoverslagproeven met aangebrachte schades blijkt dat deze niet direct leiden tot snel en catastrofaal falen, maar wel tot eerder falen dan zonder beschadiging. Bij eerdere golfoverslagproeven op zanddijken met een dunne kleibekleding, die zich mogelijk vergelijkbaar gedragen als gras op zand, werd wel relatief snel falen van de grasbekleding geconstateerd. De onzekerheid over het faalgedrag onder deze omstandigheden is groot. Grotere graafschades door vossen, dassen en bevers komen minder vaak of (nog) niet voor, maar zijn vermoedelijk vanuit veiligheidsoogpunt ontoelaatbaar.

Daarbij gaat het bij grotere graafwerkzaamheden niet enkel om de schade aan de bekleding, maar ook risico op bijvoorbeeld micro-instabiliteit of interne erosie (zie bijvoorbeeld [3,4]). We beperken ons in dit memo tot de gevolgen voor erosie door overslag en golfklap.

Andere schades die zich fysisch vergelijkbaar kunnen gedragen zijn schades door verwijderde dijkpalen/hekwerk waarbij het gat niet is opgevuld, en diepe rijsporen. Het laatste komt met name vaker voor op steile taluds tijdens bijvoorbeeld maaiwerkzaamheden.

Opgemerkt moet worden dat gatschades niet worden beschouwd in de veiligheidsbeoordeling, hoewel uit de proeven blijkt dat deze zeker effect kunnen hebben op het faalgedrag. Vanuit het perspectief van risicogestuurd beheer en onderhoud zijn deze dus zeker relevant.

## 2.3 Relevante situaties met schade

Op basis van de data uit de inspectie, input vanuit de beheerder en de data uit de golfklap- en overslagproeven beschouwen we de volgende schades nader in de hierop volgende analyses van risicogestuurd beheer & onderhoud:

- Frequent voorkomende graafschades door konijnen en honden
- Laagfrequente graafschades door bevers, vossen en dassen
- Extreme droogte
- Rijsporen

We kijken specifiek naar de kans dat dergelijke schades bij het begin van een hoogwaterbelasting aanwezig zijn langs de Vecht. Daarbij speelt niet alleen de frequentie van

voorkomen een rol, maar ook de kans dat een schade niet wordt waargenomen in de reguliere en hoogwaterinspecties.

## 3 Hebben schades impact op de faalkans

### 3.1 Inleiding

Bij de overslag- en golfklapproeven zijn verschillende proeven gedaan die een beeld kunnen geven van het effect van de 4 nader beschouwde schades. Aannemelijk is dat al deze schades de sterkte van de grasmat en daarmee de faalkans van de kering beïnvloeden. We kijken in dit hoofdstuk op kwalitatieve wijze nader naar de invloed van slechte bedekking en gatschades op basis van proeven bij de Vechtdijk en elders. Op basis daarvan kunnen we iets zeggen over de 4 beschouwde schadetypen.

### 3.2 Slechte bedekking

De graskwaliteit kan op verschillende manieren ingedeeld worden. Volgens de huidige WBI indeling hebben de proefvakken op de Vechtdijk allemaal een gesloten zode. Dit is echter wel een brede definitie waarin duidelijk kwaliteitsverschil van de grasmat zichtbaar is, met name in de bedekkingsgraad, de aanwezigheid van kale plekken tussen de vegetatie en de hoeveelheid mos. . Daarbij geldt dat het talud op locatie 103.4 duidelijk beter is dan de andere locaties. Er zijn ook locaties met mindere kwaliteit dan de proefstroken.

#### 3.2.1 Overslag

Bij de uitgevoerde proeven is slechts bij drie golfoverslagproeven de toplaag bezweken. Bij één proef was dit een gevolg van graafschade, bij twee proeven was er een lagere erosiebestendigheid van de grasbekleding. In één van deze gevallen kan de zwakke plek mogelijk gelinkt worden aan tijdelijke afdekking van het gras voorafgaand aan de proef en in het andere geval was er sprake van een herstellende grasbekleding na de droogte van 2018 (zie paragraaf 3.4).

Falen trad pas op bij een hoge belasting en de kans op een dergelijke belasting is maar zeer klein op de Vechtdijk: uit de overslagberekeningen in de relevantiestudie zijn de ontwerpwaarden van het overslagdebiet allemaal < 50 l/m/s. Bij de proeven ging het faalproces na falen van de toplaag wel zeer snel.

In Figuur 3-1 zijn de proefresultaten van de golfoverslagproeven in 2021 op de Vechtdijk weergegeven. Bovenaan de kolommen staat de belasting genoemd. Elke blokje staat voor 5 uur belasting.



Figuur 3-1 grafisch overzicht proefresultaten golfoverslag Vechtdijk

De proef 9-1\_14.0 Bui. is waarschijnlijk toe te schrijven aan een lagere bedekkingsgraad. Deze proef betrof een zuidhelling, talud ongeveer 1:3.4. In 2018 is hier schade opgetreden



door droogte. Tijdens de voorjaarsopname van de vegetatie was deze slechts 50%, bij de najaars opname was deze wel gestegen tot 80% (zie Paragraaf 3.8.2), maar met name bovenaan het talud oogde de vegetatie zeer open tijdens de proeven. . Na 25 uur begon schade op te treden, na 26 uur nam de erosiesnelheid enorm toe waardoor 'falen' snel optrad.

Samenvattend lijkt de bedekkingsgraad van beperkte invloed op falen van de proefstroken. Er zijn echter ook slechtere stukken langs de Vecht. Dijkvakken waarbij in 2018 de grasmat dood was zijn buiten de scope van de proeven gehouden. Het gegeven dat het erosieproces zo snel gaat na falen van de toplaag vereist op deze stukken wel voorzichtigheid.

### 3.2.2 Golfklappen

Er zijn ook golfklapproeven uitgevoerd op proefvakken met een relatief lage bedekking tijdens de voorjaarsopname. Mede op basis hiervan waren de locaties ook uitgekozen voor grootschalige proeven. In het najaar is de bedekking wederom opgenomen en daarbij was de bedekking op deze locaties toegenomen. Bij 2 van de 3 proeven (9-1\_14.2 en 9-1\_18.0) is de toplaag bezweken. Voor die eerste locatie was de bedekkingsgraad bij de voorjaarsopname ongeveer 60% (waarvan 50% grassen en 50% kruiden). Bij de opname voorafgaand aan de proeven is de bedekking toegenomen tot circa 80% (waarvan 25% grassen en 75% kruiden). Na 2040 golfklappen (ruim 4 uur) bezweek de grasbekleding. Bij de tweede locatie was de bedekking bij de voorjaarsopname ca. 80% (waarvan 25% grassen en 75% kruiden) en in het najaar is de bedekking toegenomen tot 90% met dezelfde verhouding tussen grassen en kruiden. Daar is de bekleding bezweken na 4080 klappen (ruim 8 uur). In beide gevallen was de gesimuleerde golfhoogte 60 à 70 centimeter. Het vak wat niet bezweek (53-3\_103.4) had een goede egale bedekking van 90% bij zowel de voorjaarsopname als in het najaar. Het percentage grassen was hier aanmerkelijk hoger, namelijk 90% grassen en 10% kruiden bij de voorjaarsopname en 70% grassen en 30% kruiden in het najaar. Hieruit blijkt dat de bedekkingsgraad van met name grassen invloed heeft op de faalkans voor golfklap.

Bij het traject Zwolle – Olst zijn in een eerder stadium ook golfklapproeven uitgevoerd. Daar werd de grasbekleding als 'gesloten zode' gekwalificeerd, dus een goede grasmat. Echter daar werd de grasbekleding wel fors (tot 20cm diep)<sup>1</sup> beschadigd met golfklappen.

Opgemerkt moet worden dat alle proeven zijn uitgevoerd met een golfhoogte van circa 65 cm. In de praktijk zullen onder voor het buitentalud maatgevende omstandigheden nog wat grotere golven kunnen voorkomen langs de Vecht. Waar bij overslag de relatieve belasting extreem hoog was, is dat bij de golfklapproeven niet het geval.

## 3.3 Gatschade

### 3.3.1 Overslag

Gatschade is in de overslagproeven op de Vechtdijk aan bod gekomen. Van één proef kan gesteld worden dat een kunstmatige (aangebrachte) gatschade tot falen van toplaag heeft geleid (9-1\_18.2 Bin.). Maar ook bij deze proef was een hoge belasting benodigd waarvan de kans op voorkomen klein is. Opnieuw werd een snelle uitbreiding van de schade waargenomen nadat de toplaag was bezweken.

Op het traject Zwolle – Olst zijn ook een aantal proeven uitgevoerd. Alle beproefde teststroken hadden een gesloten zode. Uit grondonderzoek is gebleken dat de grond zand

---

<sup>1</sup> Merk op dat hier een andere faaldefinitie is gehanteerd dan bij de Vechtdijk, waardoor de standtijd hier wat lager uitvalt. Daarnaast is het talud wat steiler waardoor de effectieve golfbelasting hoger is.

betreft, maar gelet op het lutum- en zandgehalte, zich meer richting de grens tussen zand en klei bevindt (zie Paragraaf 3.6).

Onderstaand een kort verslag van Teststrook 2 waarbij sprake was van gatschade, afkomstig uit het Factual Report van de proeven bij Zwolle – Olst<sup>2</sup>.

#### **Teststrook 2 Zwolle-Olst**

*Na 2 stormuren met een overslagdebiet van 30 l/s per m kon er in vak 7B niet meer alleen van slijtage worden gesproken: de zode was zodanig geërodeerd dat het doorwortelde deel van toplaag zichtbaar was geworden en er dus sprake was begin van schade.*

*Gedurende 5 stormuren met een overslagdebiet van 50 l/s per m wat breder en dieper (maximaal 30 cm) geworden. Tijdens het laatste half uur van proef GO50 was er op de grens tussen vakken 8B en 9B een gat door de doorwortelde toplaag ontstaan. Na het ontstaan van het gat was het talud, door uitspoeling van het zand, circa 25 cm ondermijnd. Het gat was 50 cm diep.*

*Voor zover kon worden nagegaan was geen sprake van kortsluiting met een mollengang. Hoewel niet is uitgesloten dat sprake is van uitspoelen van zand uit een tussenzandlaag/zandscheg, wordt het ontstaan van het gat als falen van de toplaag beschouwd.*

Naast bovengenoemde proeven zijn er bij eerdere proeven ook een aantal proefvakken getest waarin graverij of kunstmatige gaten aanwezig waren (voornamelijk mollengangen/molshopen). Op basis van de observaties en ervaringen bij die proeven is de huidige inschatting van experts dat graverij/ gatschade groter dan een konijnenhol een risico is op falen van de bekleding. Mollengangen worden als een klein risico ingeschat. Er zijn een aantal voorwaarden waaraan voldaan moet worden voor een gat bijdraagt aan schade van de dijk door overslag, namelijk:

- Er moet spraken zijn van water over de dijk (overloop/ overslag);
- De graafgang moet reiken tot in het zand;
- Het gat moet ongunstig georiënteerd zijn (water moet er in en moet er weer uit/ bijv parallel aan talud)
- De taludhelling is waarschijnlijk van invloed. Hoe steiler hoe ongunstiger. De taludhelling heeft invloed op de stroomsnelheid op het talud, maar ook voor de gradiënt bij uit het talud tredend water.

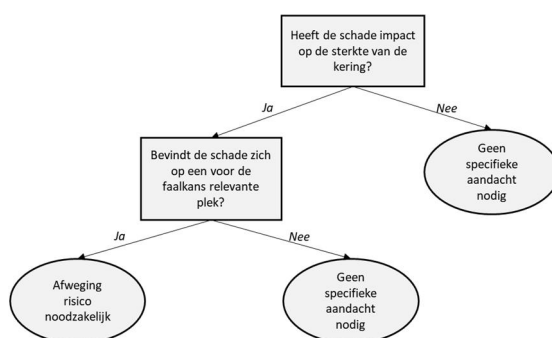
In recente proeven bij de Hedwige-Prosperpolder is het beeld bevestigd dat graafschade aanzienlijke invloed kan hebben op de sterkte bij golfoverslag.

### **3.3.2 Golfklap**

Bij de golfklapproeven op de Vechtdijk zijn geen secties beproefd waar zich gatschades als graverij op het talud bevonden. Dat maakt het inschatten van het effect hiervan bij gras op zand lastig. In [5] is een aantal golfklapproeven beschreven, zowel met klei als zandige ondergrond. Hieruit blijkt dat bij gras op klei verreweg de grootste sterkte wordt behaald door de kleilaag indien deze voldoende dikte heeft, en dat de kwaliteit van de grasmat in dat geval een beperkte rol speelt. Ook bij zandige ondergrond blijkt er nog sterkte te zijn (wel veel minder) door de doorworteling van de toplaag. Uit de proeven bij de Vecht blijkt dat, zodra deze doorwortelde zone doorbroken is het erosieproces zeer snel kan gaan. Wanneer graafschades of andere gaten van enig formaat dus door de doorwortelde zone gaan kan het faalproces zeer snel verlopen, wanneer dit niet het geval is zal het effect van graafschade beperkt zijn. Daarbij moet opgemerkt worden dat ook zonder graafschade de sterkte van de grasbekleding beperkt is, zowel in de proeven in [5] als bij de proeven langs de Vecht en op de IJsseldijk voor project Zwolle Olst.

---

<sup>2</sup> Infram; Factual Report praktijkproeven IJsseldijk Zwolle-Olst, Versie: 3,0, 30 juli 2020, 9i814



Figuur 3-2 Beslisboom omgang met schade.

### 3.4 Welke schades vereisen extra aandacht

In dit hoofdstuk hebben we gekeken naar de invloed van een lage bedekkingsgraad en gatschades op de sterkte bij golfoverslag en golfklap. Op basis daarvan kunnen we de eerste geselecteerde schadetypen (zie paragraaf 2.3) nader filteren op basis van relevantie. We gebruiken daarvoor de beslisboom in Figuur 3-2 voor de 4 geselecteerde schadetypen. Een samenvatting is gegeven in Tabel 3-1. Merk op dat hier geen rekening wordt gehouden met eventuele reststerkte van het zandlichaam. In het algemeen geldt dat schade vaak op specifieke locaties, en onder specifieke omstandigheden van belang is. Hoe hiermee in het handelingsperspectief kan worden omgegaan wordt in Hoofdstuk 4 besproken.

Tabel 3-1 Consequenties verschillende typen schade voor verschillende faalmechanismen.

Schadetype	Faal-mechanisme	Impact op de sterkte?	Relevante plek?	Waar aandacht vereist?
<b>Kleine graverij (konijn, hond)</b>	Overslag	Graafschade heeft invloed op de sterkte bij overslag. Echter treedt falen bij de proefstroken pas op bij zeer hoge belastingen die langs de Vecht niet of nauwelijks kunnen voorkomen. Opgemerkt moet worden dat er ook delen van de grasbekleding slechter zijn dan de proefstroken, daar zou dit wel een extra risico kunnen vormen.	Graafschades lager bij de teen en op steilere taluds zijn relevanter	Taluds met slechtere grasmat dan proefstroken en/of steilere taluds.
	Golfklap	Relatief kleine gaten hebben vermoedelijk weinig onderscheidend effect op de sterkte. Ook zonder schade is de sterkte al beperkt. Het risico neemt snel toe als gaten enige omvang hebben en door de toplaag heen gaan tot het onderliggende zand	De golfklapzone bij de maatgevende omstandigheden ligt langs de Vecht meestal midden op het talud.	Midden op het talud. Meer focus op steilere taluds en uiteraard de locaties met de hoogste golven
<b>Grote graverij (bevers, vossen en dassen)</b>	Overslag	Voor externe erosie door overslag geldt hetzelfde als voor kleine graverij, hoewel de kans dat golven 'aan kunnen grijpen' op een groter gat wel groter is. Aanvullend geldt nog dat bij grote graafschades er ook sprake kan zijn van interne erosie en stabiliteitsproblemen op het binnentalud. Daar is in de erosieproeven geen aandacht aan besteed maar het maakt van grote graafschades een groot risico.	In [4] is dit uitgewerkt voor interne erosie en stabiliteit. Grote hopen vanuit het buitentalud (met name laag) leiden tot een sterk verhoogd freatisch vlak. Doorgaande hopen tot snelle interne erosie, en hopen op het binnentalud kunnen microinstabiliteit veroorzaken, zeker bij infiltratie van overslaand water. Bij golfoverslag geldt dat lager op het talud ongunstiger is	Grote graverij tot diep in de dijk moet in alle gevallen worden voorkomen <sup>3</sup> .

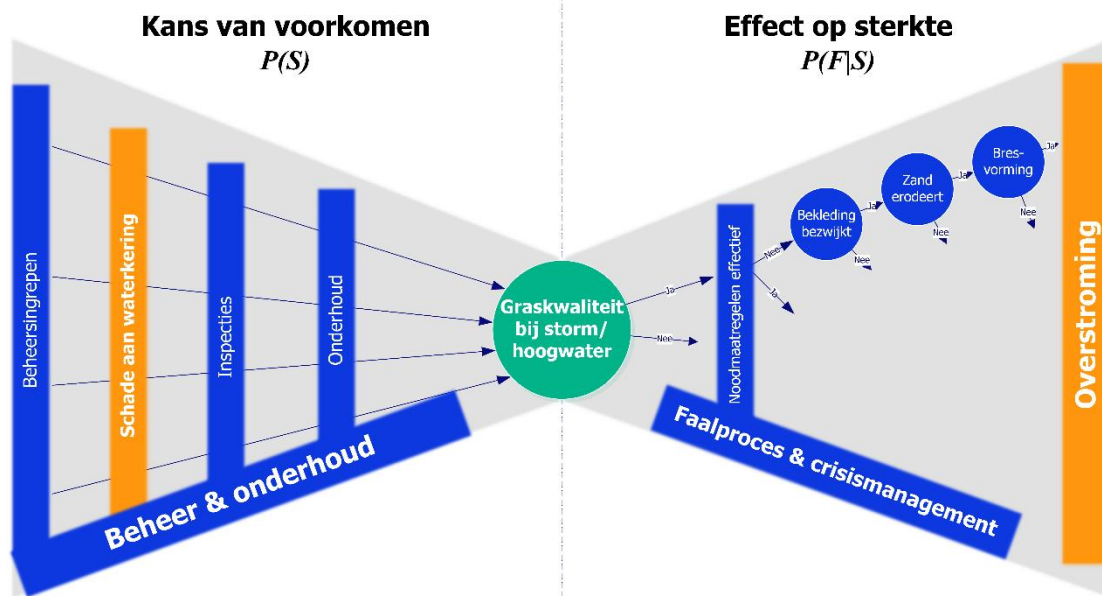
<sup>3</sup> Helemaal voorkomen zal in de praktijk erg lastig zijn, maar risicogestuurd beheer & onderhoud kan wel zo worden ingestoken dat de kans acceptabel klein wordt. Overigens is dit iets wat voor alle dijken geldt, en niet alleen voor zanddijken langs de Vecht. Daarbij kan ook worden gekeken naar maatregelen specifiek gericht op het voorkomen van graafschade, zowel constructief (bijv gaas of andere ondoordringbare lagen in de bekleding) als anderszins (voorkomen van gunstige omstandigheden voor gravers)..

	Golfklap	Na doorbreken van de toplaag gaat het faalproces zeer snel. Dat zal bij grote graafschades zeker het geval zijn, met het additionele effect van de eventuele achterliggende gangen en kamers.	Met name de golfklapzone, maar in het algemeen leiden stelsels van kamers en gangen tot snellere instorting.	Grote graverij moet in alle gevallen worden voorkomen.
	Overige mechanismen	Door de grootte van de hopen kan dergelijke graverij leiden tot instorting en een hoge freatische lijn. Dat maakt dat dergelijke graverij een groot risico vormt.	Met name hopen laag op het binnentalud en hopen onder de waterlijn op het buitentalud	Grote graverij moet in alle gevallen worden voorkomen.
<b>Droogteschade</b>	Overslag	De afname van de bedekkingsgraad door droogte heeft een negatief effect op de erosiebestendigheid bij overslag. Falen bij de proefstroken trad echter pas op bij belastingen die langs de Vecht niet of nauwelijks voorkomen. Opgemerkt moet worden dat er ook delen van de grasbekleding slechter zijn dan de proefstroken, daar zou dit wel een extra risico kunnen vormen	Bij de teen, op steile taluds, en bij eventuele overgangsconstructies treedt eerder erosie op door overslag. Daar is dit dus het meest relevant.	Taluds met een slechtere grasmat dan de proefstroken en/of steilere taluds
	Golfklap	De bedekkingsgraad bij de golfklapproeven varieerde. Daaruit bleek een verband tussen bedekkingsgraad van met name grassen en de standtijd. De golfhoogtes waren niet extreem hoog voor de Vecht	De golfklapzone bij de maatgevende omstandigheden ligt langs de Vecht meestal midden op het talud.	Midden op het talud. Meer focus op steilere taluds en uiteraard de locaties met de hoogste golven
<b>Rijsporen</b>	Overslag	Rijsporen kunnen leiden tot een combinatie van oneffenheid en een lagere bedekkingsgraad. Dat gecombineerde effect leidt tot een lagere erosiebestendigheid en een hogere belasting door de oneffenheid. Dit is wel relatief lokaal.	Rond de teen zijn de stroomsnelheden het hoogst. In geval van een weg op de dijk is de zone naast de weg een risicovolle plek, weinig schade kan dan sneller tot kruinverlaging leiden.	Steilere taluds en rond wegen, en wegovergangen.
	Golfklap	Zie boven. Het ontstaan van rijsporen in de golfklapzone is niet zo waarschijnlijk, zeker niet wanneer bij maaiwerkzaamheden hier extra op wordt gelet.	Met name op steile taluds kan dit ene probleem vormen omdat het moeilijk is maaiwerk te verrichten zonder het talud te beschadigen.	Kan meegenomen worden in de schouw na het maaiwerk, primair in de golfklapzone. Vermoedelijk concentreert dit zich op enkele 'lastig te maaien' vakken.

## 4 Wat is het handelingsperspectief om risicogestuurd om te gaan met schades aan gras op zanddijken?

Uiteindelijk is het zaak om te voorkomen dat er een overstroming optreedt langs de Vecht. Verschillende onderdelen van het beheer, onderhoud, ontwerp, en crisismanagement dragen daaraan bij. Dit is gestructureerd in het bowtie diagram in Figuur 4-1.

Bowtie-diagrammen zijn een middel om scenario's te structureren in de context van risicomanagement. Daarbij worden bedreigingen (bijv. grote graafschade) en gevolgen (overstromingen) als gevolg van een kritisch event (hoogwater/storm) gekoppeld aan zogeheten veiligheidsbarrières. Op deze manier kan zowel kwalitatief als kwantitatief in kaart worden gebracht welke veiligheidsbarrières invloed hebben op het scenario dat een bedreiging leidt tot gevolgen (in dit geval dat een grote graafschade leidt tot een overstroming langs de Vecht).



Figuur 4-1 Bowtie voor de hoofdonderdelen van het handelingsperspectief.

In onderstaande tabel is een aantal richtingen uit het handelingsperspectief en het effect op ofwel de kans op schade bij het begin van een hoogwater ( $P(S)$ ) als het effect van schade op de sterkte ( $P(F|S)$ ) weergegeven. Elk van deze richtingen vormt (een verbetering van) een veiligheidsbarrière uit de figuur.



Tabel 4-1 Voorbeelden van maatregelen die als onderdeel van risicogestuurd beheer en onderhoud kunnen worden ingezet.

	Maatregel	Effect	Toelichting
Reguliere inspecties	Frequenter inspecteren	$\downarrow P(S)$	Wanneer vaker wordt geïnspecteerd worden schades sneller opgemerkt en kunnen deze voor het eerstvolgende hoogwater worden gerepareerd.
	Verbeteren nauwkeurigheid inspecties	$\downarrow P(S)$	Verbeteren van de inspectienauwkeurigheid voorkomt dat belangrijke schades worden gemist
Onderhoud & beheer	Verlagen interventieniveau voor reparatie/onderhoud	$\downarrow P(S)$	Door bij beginnende schade sneller in te grijpen wordt de kans dat een schade zich ontwikkeld tot een veiligheidsprobleem verkleind.
	Verbeteren kwaliteit grasmat door onderhoudsbemesting	$\downarrow P(S)$ & $\downarrow P(F/S)$	Door onderhoudsbemesting kan de sterkte en weerbaarheid van de grasmat worden vergroot waardoor deze minder kwetsbaar is, sneller herstelt en een hogere sterkte heeft.
Ontwerp	Aanbrengen erosiebestendige onderlaag	$\downarrow P(F/S)$	Door het aanbrengen van een erosiebestendige onderlaag (bijv. kleilaag of bentonietmat) wordt voor veel schadetypen de invloed van schade verminderd.
	Preventieve maatregelen tegen graverij	$\downarrow P(S)$ & $\downarrow P(F/S)$	Er zijn verschillende mogelijkheden om dijktaaluds minder aantrekkelijk te maken voor gravers, zowel constructief als qua beheer/landschapsinrichting.
	Verflauwen talud	$\downarrow P(S)$ & $\downarrow P(F/S)$	Verflauwen van het talud leidt tot een grotere restbreedte. Daarnaast minder kans op rijschade.
Crisismanagement	Vorbereiden bekrammingen t.b.v. noodsituaties	$\downarrow P(F/S)$	Met het voorbereiden van maatregelen bij calamiteiten kan de faalkans gegeven aanwezige schade worden verkleind.
	Intensiever & gericht inspecteren bij hoogwater	$\downarrow P(F/S)$	Door tijdens en in de aanloop naar hoogwater intensiever en gericht te inspecteren, met name op risicovolle punten kan de kans dat schade zich ontwikkelt tot een dijkdoorbraak worden verkleind.

In de volgende paragrafen bespreken we in meer detail het handelingsperspectief op de verschillende onderdelen

## 4.1 Reguliere inspecties

Reguliere inspecties worden typisch uitgevoerd in voor- en najaar, en in sommige gevallen in de vorm van bijvoorbeeld dagelijkse inspecties of noodinspecties tussendoor (bijv. bij droogte). Het effect van reguliere inspecties is dat schades worden waargenomen voordat er een storm of hoogwater optreedt. We beschouwen twee aanpassingen: frequenter inspecteren en het verbeteren van de nauwkeurigheid.

### 4.1.1 Frequenter inspecteren

Door frequenter te inspecteren komen nieuw ontstane schades sneller aan het licht. Dit speelt vooral een grote rol bij schades die plotseling kunnen ontstaan, zoals graafschade, afdekking

en rijsporen. Het sneller verhelpen van bijvoorbeeld afdekking voorkomt ook dat grotere schade kan ontstaan.

Opgemerkt moet worden dat omdat dijken vooral in het winterhalfjaar worden belast naast de frequentie ook het moment van inspecteren relevant is: de kans dat er tussen bijvoorbeeld voorjaarsinspectie en het daaropvolgende hoogwater schade ontstaat is groter dan tussen een najaarsinspectie en het daaropvolgende hoogwater. Een mogelijke invulling is dus ook om in het najaar intensiever te inspecteren, bijvoorbeeld op rijsporen (na maaiwerkzaamheden) en graafschade.

#### 4.1.2 Verbeteren nauwkeurigheid inspecties

Tijdens (visuele) inspecties blijven sommige schades onopgemerkt. Dat is in het verleden onderzocht voor bruggen, vliegtuigen en pijpleidingen, en recent ook voor waterkeringen (zie [6]<sup>4</sup>). Hierbij is door 22 inspecteurs 14 keer een viertal dijkvakken geïnspecteerd langs de Waal, conform de Digigids. Op ieder dijkvak was een aantal schades te zien, variërend van kleine en grote graafschades, tot losse basaltblokken en ruigtes. Het blijkt dat er veel variatie is in het percentage meldingen van schades, zowel per inspecteur als per schadepunt/-soort. Als een schade gemeld wordt is de variatie in de ingeschatte ernst ook vrij groot. Er zijn dus grofweg 2 onnauwkeurigheden:

- Sommige schades worden niet gezien en dus niet gemeld
- Sommige schades worden niet goed ingeschat qua ernst en daardoor ofwel niet gemeld (m.n. bij ernst 'goed' conform de Digigids), ofwel niet opgepakt in het onderhoud (bijv. wanneer ernstige schade als 'redelijk' wordt gemeld).

Het kan dus niet zondermeer gezegd worden dat na een inspectie alle schades in beeld zijn. Overigens is dit iets wat bij alle toepassingen terugkomt, en dus ook voor bijvoorbeeld bruggen geldt.

Er zijn een aantal verbeterrichtingen om de nauwkeurigheid van inspecties te verbeteren, die ook in de context van de Vechtdijken interessant kunnen zijn. Uit onderzoek blijkt dat inspecties waarbij op minder zaken gelet hoeft te worden een significant hogere nauwkeurigheid hebben. Daarnaast weten we, onder andere vanuit de analyses in de relevantiestudie, dat de plaats op het talud van een schade veel uit kan maken voor het effect op de faalkans. Binnen het handelingsperspectief van 'verbeteren inspecties' zijn er dus in ieder geval 2 mogelijkheden op inspecties én nauwkeuriger én risicogestuurd te maken:

- Gerichter inspecteren van relevante taluddelen/locaties: Uit de proef in [6] blijkt dat steenzettingen lastiger te inspecteren zijn dan grasbekledingen. De hypothese is dat dit samenhangt met het feit dat het lastiger is om bij steenzettingen alle details goed te interpreteren<sup>5</sup>. Analooq hieraan zal vermoedelijk hetzelfde gelden bij grasbekledingen: wanneer een inspecteur een beperkt deel van een talud inspecteert is het eenvoudiger om overzicht te houden en resulteert dit in een nauwkeurigere inspectie. Een aantal relevante taluddelen/locaties zijn:
  - Steile buitentaluds in verband met de vaak mindere staat en potentiële golfaanval
  - Buitentaluds op locaties met relatief grote golven
  - Beide taluds op locaties waar historisch gezien veel gravers voorkomen.
  - Taluds waar de geometrie van de dijk maaiwerkzaamheden lastig maakt.

---

<sup>4</sup> De referentie is naar een wetenschappelijke publicatie. Een Nederlandse samenvatting is te downloaden via [https://deltares-my.sharepoint.com/:b/g/personal/wouterjan\\_klerk\\_deltares\\_nl/EWXln-SolnFPoDo4c5kKXMwBRdkoASCrsErPlvf6HUbD8w?e=70F3GO](https://deltares-my.sharepoint.com/:b/g/personal/wouterjan_klerk_deltares_nl/EWXln-SolnFPoDo4c5kKXMwBRdkoASCrsErPlvf6HUbD8w?e=70F3GO)

<sup>5</sup> Tijdens de proef werden losliggende basaltblokken lager op het talud enkel waargenomen door inspecteurs die nagenoeg over deze stenen heen zijn gelopen. Inspecteurs die op enkele meters passeerden zagen deze schades niet.

- Gericht inspecteren op enkele risicovolle schadetypen: er kan gericht worden geïnspecteerd op schades die potentieel grote gevolgen hebben en/of vaak voorkomen. Ter illustratie: wanneer enkel wordt geïnspecteerd op graverij zal het detectiepercentage van relevante graafschades hoger zijn dan wanneer dit een van de vele typen schade is die bij bijvoorbeeld een voorjaarsinspectie moet worden gecontroleerd. Uiteraard kan dit ook gecombineerd worden met het eerder genoemde punt, dus bijvoorbeeld inspecteren op graafschade nabij de binnenteen, of in de golfklapzone.

## 4.2 Onderhoud & beheer

### 4.2.1 Verlagen interventieniveau

Het verlagen van het interventieniveau houdt concreet in dat er bij beginnende schade sneller wordt opgetreden. Dit is bij waterkeringen echter minder relevant om de volgende redenen:

- Gras heeft een groot herstellend vermogen, waardoor bijvoorbeeld kleinere kale plekken vaak vanzelf dichtgroeien.
- Veel van de schades (bijv. graverij, rijsporen) treden willekeurig in de tijd op en daarbij is de schade dermate groot dat in een zeer korte tijdspanne (onacceptabele) schade ontstaat. Het verlagen van het interventieniveau is dan niet effectief.

In algemene zin is dit dus niet een ingreep die veel effect zal hebben.

### 4.2.2 Verbeteren kwaliteit grasmat door onderhoudsbemesting

De bodem van de Vechtdijken is zeer schraal. Dat leidt tot een kwetsbare grasmat, die bijvoorbeeld ook gevoelig is voor droogteschade. Door onderhoudsbemesting kan de grasmat in algemene zin sterker worden gemaakt, maar wordt deze ook weerbaarder tegen o.a. droogteschade. Uiteraard moet dit in samenhang worden gezien met eventuele ontwerpkeuzes. De kwaliteit van de grasmat wordt relatief van minder belang als er een kleilaag onder wordt aangebracht (zie [5]).

## 4.3 Ontwerp

### 4.3.1 Aanbrengen erosiebestendige onderlaag

Door het aanbrengen van een erosiebestendige onderlaag wordt een groot deel van het veiligheidstekort van de Vechtdijken voor mechanismen GEBU en GEKB opgelost. Klei op het buitentalud onder golfaanval erodeert in geringe mate bij de beperkte golfhoogte waarvan langs de Vechtdijk sprake is. Voor schades aan het buitentalud geldt dat er veel mogelijke schades zijn die de erosiebestendigheid van de grasmat kunnen verminderen. Uit de proeven in [5] blijkt dat bij een goede kleionderlaag de staat van de grasmat relatief weinig invloed heeft op het falen. Dat maakt aanbrengen van een erosiebestendige laag (klei, of een ander materiaal) vermoedelijk een effectieve maatregel.

Voor het binnentalud geldt dat uit de overslagproeven blijkt dat een aantal veelvoorkomende schades maar beperkte invloed hebben op de erosiebestendigheid. Daar lijkt de relatieve bijdrage van een erosiebestendige laag dus minder groot.

### 4.3.2 Preventieve maatregelen tegen graverij

Graafactiviteit door grote gravers is vermoedelijk in de meeste gevallen onacceptabel vanuit veiligheidsperspectief. Er zijn verschillende mogelijkheden voor het tegengaan van graverij door bijvoorbeeld bevers, enkele voorbeelden (zie ook Niewold [7]):

- Aanleg van hoogwatervluchtheuvels in het rivierbed. Dit voorkomt dat bevers bij hoogwater de dijk in vluchten.
- Beverbeheer door het vangen van bevers op kritische locaties, en vervolgens herplaatsen. Bij sommige niet-beschermden soorten kan ook afvangen

- Constructieve maatregelen zoals het verticaal inbrengen van gaas in oevers. Opgemerkt moet worden dat ook het aanbrengen van een erosiebestendige laag waarschijnlijk het risico van graverij al beperkt doordat dergelijke taluds minder aantrekkelijk worden voor graafwerkzaamheden.

#### 4.3.3 Verflauwen talud

In de modellen voor de veiligheidsbeoordeling van GEBU en GEKB op een gedetailleerd niveau wordt de taludhelling niet expliciet meegenomen. Echter, omdat stroomsnelheden en golfdrukken op flauwere taluds lager zijn kan dit in de praktijk wel degelijk een effectieve versterkingswijze zijn (overigens wordt het talud in recent ontwikkelde modellen vaak wel expliciet meegenomen). Verflauwen van het talud biedt nog enkele andere voordelen op het vlak van B&O:

- Doordat het makkelijker te maaien is door de kleinere hellingshoek voorkomt verflauwen (rij)schade door maaiwerkzaamheden.
- Door de kleinere hellingshoek infiltreert meer regenwater in het talud, en wordt vermoedelijk bemesting beter opgenomen. Een van de waarnemingen van de beheerder (zie bijlage) is dat voedingsstoffen in de huidige situatie vaak goeddeels van het talud af spoelen.
- Wanneer falen wordt beschouwd inclusief reststerkte geeft een taludverflauwing ook meer restbreedte en daarmee een hoger veiligheidsniveau.

#### 4.3.4 Overslagdebiet als ontwerpparameter

Een belangrijke parameter in het ontwerp is het toelaatbare overslagdebiet. Uit de proeven blijkt dat er behoorlijke overslagdebieten kunnen worden weerstaan door een intacte grasmat, en nog steeds aanzienlijke maar wel kleinere overslagdebieten in gevallen waarbij schade een rol speelt. Door een kleiner overslagdebiet toe te staan kan de impact van schade op het binnentalud verder worden ingeperkt.

### 4.4 Crisismanagement

De laatste veiligheidsbarrière in de bowtie bestaat uit maatregelen op het vlak van crisismanagement. We richten ons daarbij op 2 zaken: het detecteren van schades bij hoogwater en het toepassen van noodmaatregelen (specifiek krammatten). Een belangrijk aspect bij crisismanagement is de voorspelbaarheid van de situatie. De hoogwatervoorspelling van de Vecht wordt gemaakt op basis van een probabilistische forecast 10 dagen van te voren (op basis van een ECMWF ensemble). 4 dagen van te voren wordt een 2<sup>e</sup> ensemble toegevoegd, op dat moment is al redelijk duidelijk of er een hoogwater komt of niet. M.b.t. de afvoer voor het gedeelte van de Vecht rond en benedenstrooms van Dalfsen is de reactietijd dus ongeveer 4 à 5 dagen (3/4 dagen voorspeltijd + 1 dag eer de hoge afvoer Dalfsen bereikt). Dat is normaliter ruim voldoende om de benodigde maatregelen te treffen.

Voor het buitentalud is dan nog de windvoorspelling van belang, deze is wat onzekerder maar dit speelt ook vooral een rol op taluds met een specifieke oriëntatie (NW).

Aandachtspunt bij de Vecht is dat het een grotendeels regengedomineerde rivier is. Hoge afvoeren treden dus niet perse in de winter op.

#### 4.4.1 Noodmaatregel krammatten

Uit onderzoek van Lendering et al. [8] blijkt dat, hoewel niet 100% betrouwbaar, noodmaatregelen toch tot een forse afname van de overstromingskans kunnen leiden. Na de droge zomer van 2018 zijn voor alle 'verdroogde' taluds (6 kilometer in totaal) krammatten aangeschaft. Hierbij is niet gekeken naar het risico: ook voor flauwe taluds, in de luwte, en voor plaatsen waar de dijk overhoogte heeft zijn voorzieningen aangeschaft. Dit is in principe

niet nodig, en een verbetering kan zijn om een duidelijk onderscheid te maken tussen dijkvakken en (delen van) taluds waar krammatten de grootste veiligheidsbijdrage hebben. Een bijkomend voordeel is dat in crisissituaties de kans dat alle noodmaatregelen tijdig getroffen zijn toeneemt wanneer er een heldere prioritering van locaties is. In algemene zin moet t.a.v. installatie de volgende twee vragen worden beantwoord:

- Kunnen de noodmaatregelen op de gewenste locaties worden aangebracht voor of tijdens de maatgevende omstandigheden? (bijv. bij zeer zware storm)
- Is er voldoende capaciteit om op alle gewenste locaties in het gehele areaal dit te realiseren?

#### **4.4.2 Intensiever & gericht inspecteren bij hoogwater**

Uit Tabel 3-1 blijkt dat er een aantal zones zijn die extra aandacht vereisen tijdens hoogwater. Het gaat daarbij primair om de golfklapzone op het buitentalud, dijkvakken met steile taluds en de zone rond de teen (en eventuele overgangsconstructies). Het handelingsperspectief is vergelijkbaar met 4.1, met de kanttekening dat de verwachte hydraulische condities in ogenschouw moeten worden genomen (denk aan inspecties bij serieuze overslagdebieten).



## 5 Handelingsperspectief voor de Vechtdijk

In het vorige hoofdstuk is een selectie van ingrepen en verbeteringen in het risicogestuurd omgaan met schades op de Vechtdijk. Een belangrijk uitgangspunt daarbij is dat als faaldefinitie is gehanteerd dat falen optreedt als de grasmat faalt (d.w.z. de kans op overstromen na doorbreken van de toplaag is gelijk aan 1 gesteld). Met falen van de grasmat wordt een doorbraak van de toplaag bedoeld. De dikte van de toplaag is in de orde van 0,3 à 0,4 m. Zie paragraaf 3.4 voor de beschrijving van falen van de toplaag. Uit de analyses in de relevantiestudie (P2) blijkt echter dat het expliciet in rekening brengen van de sterkte van de zandkern, met name bij golfklap, een grote bijdrage levert aan de algehele inschatting van de sterkte. Daarbij kunnen grote volumes zand afslaan, maar is er vaak nog wel voldoende restbreedte over om een overstroming te voorkomen. Een dergelijke faaldefinitie stemt beter overeen met de overstromingskansbenadering, maar vereist acceptatie van incidenteel grote schade, en een plan om dit eventueel snel te kunnen herstellen.

Vanuit het handelingsperspectief zijn een aantal mogelijkheden geschetst om meer risicogestuurd om te gaan met schades. Schade door grote gravers (bijv. bevers) is vrijwel altijd onacceptabel: dit vereist een aparte afweging in ontwerp en wat haalbaar is in detectie van graafschade, maar dit is iets wat breder speelt dan alleen voor de Vechtdijken.

In beheer en onderhoud zijn de belangrijkste mogelijke verbeterkansen om gericht en eventueel ook frequenter te inspecteren. Het gaat daarbij om specifieke locaties, zoals de golfklapzone, steile taluds en dijkvakken met veel potentiële golfaanval én specifieke schades (bijv. graverij). Dat verkleint de kans op falen met schade. In algemene zin is het raadzaam om de grasmat te verbeteren, maar dit moet worden afgewogen met eventuele keuzes die gemaakt worden t.a.v. de versterking.

Ten aanzien van de opbouw van de dijk is met name het buitentalud kritisch: hier kan bij voor de Vecht realistische belastingen al snel schade ontstaan door golfaanval, hoewel opgemerkt moet worden dat uit P2 blijkt dat er vermoedelijk veel reststerkte aanwezig is. In de huidige situatie draagt schade aan het buitentalud in de meeste gevallen niet veel bij aan de faalkans, omdat de sterkte op zichzelf al vrij beperkt is. Ook bij een klei-onderlaag van voldoende dikte op het buitentalud is de kwaliteit van het gras zelf van minder belang dan de erosiebestendigheid van de kleilaag, en de algehele veiligheid (ook zonder schade) neemt daarmee flink toe. Voor het binnentalud geldt dat er een afname van de erosiebestendigheid is bij schade, maar dat dit pas bij zeer grote, voor de Vecht onwaarschijnlijke, overslagdebieten het geval is. Daar is de relatieve bijdrage van een erosiebestendige laag aan de sterkte dus waarschijnlijk minder groot.

Het crisismanagement kan verbeterd worden door noodmaatregelen vooral te richten op risicovolle locaties: steile taluds, de golfklapzone, en locaties met relatief grote kans op overslag. Dit geldt zowel voor de inspecties bij hoogwater als de noodmaatregelen zelf.

Uit de beschouwing in dit en voorgaande hoofdstukken blijkt dat er veel verschillende mogelijkheden zijn om de impact van schade en de algehele veiligheid van de Vechtdijken, ook in de huidige situatie, te verbeteren. Uiteindelijk kan een integrale afweging van de kosten en baten van (combinaties van) verschillende maatregelen uit het handelingsperspectief helpen bij het kiezen van de meest kansrijke verbeteringen. Op deze wijze kan worden bepaald welke aspecten van risicogestuurd B&O de grootste bijdrage leveren aan veilige dijken langs de Overijsselse Vecht, en hoe dit relateert aan de scope voor dijkversterking. Deze analyse kan worden uitgevoerd na beoordeling van de Vechtdijken, bijvoorbeeld als onderdeel van de scopebepaling.

## 6 Referenties

1. Kramer, N.; Mens, M.; Beersma, J.; Kielen, N. *H2O-Online*. August 2019,.
2. KNMI *De droogte van 2018 - Een analyse op basis van het potentiële neerslagtekort*; 2018;
3. Palladino, M.R.; Barbetta, S.; Camici, S.; Claps, P.; Moramarco, T. Impact of animal burrows on earthen levee body vulnerability to seepage. *J. Flood Risk Manag.* **2020**, *13*, 1–21, doi:10.1111/jfr3.12559.
4. Taccari, M.L.; Van Der Meij, R. Investigation of the influence of animal burrowing on the failure of the levee of San Matteo along the Secchia river. In Proceedings of the E3S Web of Conferences; 2016; Vol. 9, pp. 1–6.
5. van Steeg, P. *Residual strength of grass on river dikes under wave attack*; 2013;
6. Klerk, W.J.; Kanning, W.; Kok, M.; Bronsveld, J.; Wolfert, A.R.M. Accuracy of visual inspection of flood defences. *Struct. Infrastruct. Eng.* **2021**.
7. Niewold, F. *Graverij van bevers in rivierdijken in de Gelderse Poort: een onderzoek naar risicofactoren en preventieve maatregelen*; 2007;
8. Lendering, K.T.; Jonkman, S.N.; Kok, M. Effectiveness of emergency measures for flood prevention. *J. Flood Risk Manag.* **2016**, *9*, 320–334, doi:10.1111/jfr3.12185.

## A Verslag gesprek Johan Elshof

Datum: 28 mei 2021

Deelnemers:

- Andre van Hoven (Projectleider, Deltares)
- Johan Elshof (Dijkbeheerder, WDOD)
- Wouter Jan Klerk (Adviseur, Deltares)

Doel van dit gesprek was om te verkennen hoe de bevindingen uit de erosieproeven vanuit beheersperspectief geduid kunnen worden, en wat deze betekenen voor het handelingsperspectief van de beheerder.

Bij WDOD rouleren de dijkbeheerders elke 6 a 7 jaar van gebied, en komen ook regelmatig in elkaars gebied. Johan is zelf geen beheerder van de Vechtdijk, maar kent de dijk wel goed.

Er zijn tijdens de proeven 3 locaties beproefd:

- Nabij Berkum (103.4) – zuidoever Vecht
- Nabij Dalfsen (14.2) – noordoever Vecht
- Locatie Hesseweg (18.0) – noordoever Vecht

De locaties worden representatief geacht voor het gedeelte wat qua kwaliteit niet in categorie 'rood' (zeer slecht) is ingedeeld. Er is wel duidelijk verschil tussen de locaties, zo blijkt bij de golfklapproeven locatie 103.4 aanzienlijk beter dan de andere locaties.

In algemene zin wordt gesteld dat een 1:3 talud met zand zeer lastig goed te krijgen is: enerzijds door de grotere impact van golven, maar ook omdat de ervaring is dat het hier toch iets lastiger is om het gras goed te houden. Langs de Vecht zijn de meeste buitentaluds tussen 1:3 en 1:4, binnentaluds 1:4-1:5. Enkele plekken zijn steiler. Bij de proeven bij Zwolle-Olst (ook golfklap) is de golfklapsimulator op een gedeelte met ongeveer 1:3 gezet. De sterkte bleek hier laag. Opgemerkt moet worden dat niet bij iedere proef dezelfde faaldefinitie is gehanteerd.

De uitgevoerde proeven zijn representatief voor het beheer: op alle locaties (en overall langs de Vecht) wordt ongeveer op hetzelfde tijdstip gemaaid, en wordt maaisel afgevoerd. Een belangrijke onderscheidende factor in beheer is het onderscheid tussen de noord- en

zuidoever. Het buitentalud op de noordoever heeft duidelijk meer last van droogte door de hogere zonintensiteit. Noordhellingen blijven in droge zomers veel langer goed. Opgemerkt wordt wel dat er ook wanneer het gras dood is nog steeds een wortelnet is. In het najaar kan de grasmat hierdoor nog wat herstellen, en het levert ook nog wel enige tijd sterkte (genoemd wordt ongeveer een half jaar).

In een eerdere fase van het project is een locatie nabij Dalfsen bezocht (niet de proeflocatie). Hier was de grasmat zeer slecht. Opgemerkt wordt dat het talud hier zeer steil is, en dat dit bijv. ook bij het maaien tot schade kan leiden door machines. De proeflocatie bij Dalfsen (14.2) was kwalitatief het slechtst. De inschatting is dat het moeilijk zal zijn deze op het niveau van bijv 103.4 te krijgen, maar dat het met een forse beheersinspanning wel fors verbeterd kan worden. Hoofdonderdeel daarbij is om de bovenlaag van de grond humusrijk te maken, wat zeker 10 jaar kan kosten, en jaarlijks onderhoudsbemesting vereist.

Samenvattend zijn er qua beheer mogelijkheden om de grasmat te verbeteren, maar deze vergen tijd en significante inspanning. De oriëntatie van de dijk en de steilte van het talud spelen een belangrijke rol bij het goed krijgen en houden van de grasmat.

### Schades aan de grasmat

Tijdens de proeven zijn een aantal proeven gedaan met (aangebrachte) schades (overslagproeven). Vanuit beheersperspectief is dit van belang omdat een dijk met schade minder sterk kan zijn/is dan de dijk onder normale omstandigheden. Dit vergroot dan potentieel het overstromingsrisico. In de praktijk zijn schades door langsstroming langs de Vecht nooit waargenomen en deze worden onwaarschijnlijk geacht. Daarom richten we ons op golfklap- en overslag. Voor overslag zijn de volgende proeven met schade gedaan:

- Locatie 103.4:
  - Een proef met een afdekking (3 maanden): geen falen
  - Een proef met mollenschade: wel falen, maar bij zeer hoge belasting
- Locatie 14.0:
  - Zaten wat mollen: geen effect waargenomen
- Locatie 18.2:
  - Na normale proef aantal graafschades gemaakt: vossenhol (diameter 15 cm), konijnenhol (diameter 10 cm), hondenschade (30cm, 10 cm diep). Horizontaal, iets naar beneden. Geen falen, expliciet wordt benoemd dat de hondenschade geen effect had.
  - Na maaien gras: wel falen

Samenvattend is bij overslag dus geen groot effect van schade waargenomen. Besproken wordt dat de inschatting is dat dit bij golfklap heel anders kan zijn. Onderbouwing hiervoor is te vinden in het feit dat na 'officieel falen' bij de golfklapproeven nog even doorgegaan is. De schade ontwikkelde dan zeer snel verder.

Daarnaast wordt opgemerkt dat de proeven worden gedaan op een niet-verzadigde dijk. Bij sterkere verzadiging kan ook interne erosie een rol gaan spelen. In 2010 is bij een proef langs de Vecht een peilbuis geplaatst, toen kwam deze wel tot maaiveld niveau. Grondwaterstanden in de dijk volgen een vrijwel rechte lijn.

Mbt interne erosie wordt opgemerkt dat met name doorgaande gaten zeer riskant zijn. Dit komt door het onderscheid tussen grondwater en 'vrij water'. Dit laatste is ook bij proeven bij de Hedwigepolder waargenomen: water infiltreerde hier door gaten/scheuren hoog op het talud en kwam er lager weer uit. Dit leidde tot snel falen.

Vervolgens is gesproken over het waarnemen van schade. Het is in het veld lastig onderscheid te maken tussen grote en kleinere holen. Als voorbeeld wordt een vossenhol wat

(bijna) helemaal doorgaand was genoemd. Hier lag nauwelijks zand op het talud. De inschatting is dat konijnen- en vossenholen goed te zien moeten zijn, hoewel het altijd het geval kan zijn dat je er een paar mist. Er wordt ieder voor- en najaar op geïnspecteerd. Het lastige is dat 'ze ieder moment kunnen beginnen'. Bij hoogwaterinspecties wordt al voor het echt hoogwater is geïnspecteerd. De verwachting is dat schades dan nog wel worden waargenomen, in dat geval wordt indien nodig geacht het gat afgedekt met zandzakken.

### Handelingsperspectief

Globaal gezien zijn 2 hoofdsporen ter sprake gekomen:

- het ontwerpen van de dijk zodanig dat deze zonder het meenemen van de reststerkte van het dijklichaam voldoende veilig is.
- het beschouwen van de dijk als 'duin' en daarmee schade aan de kern toestaan.

Voor het ontwerp van de dijk worden 2 richtingen onderscheiden:

- aanbrengen van klei, in ieder geval op buitentalud en eventueel op binnentalud
- verflauwen van beide taluds.

Ten aanzien van beheer, onderhoud & inspectie worden de volgende punten benoemd:

- Het beheer moet zich sowieso richten op het creëren van een grasmat van voldoende kwaliteit, zonder significante kale plekken. Daarvoor moet in ieder geval meer humus in de grond worden gebracht, de grond is nu te schraal en voedingsstoffen spoelen ook naar beneden van het talud af. Opgemerkt wordt dat een droge zomer nog steeds een probleem zal zijn in dit streven.
- Bij inspecties kan gerichter en gefocuster worden geïnspecteerd op steilere buitentaluds, en in het algemeen op buitentaluds.

Ten aanzien van de crisisorganisatie worden de volgende punten benoemd:

- Na de droge zomer van 2018 is voor 6km dijk bekrammingen aangeschaft. Dit is ook gedaan voor plekken in de luwte, wat in feite niet nodig is. Dit kan dus meer risicogestuurd worden ingezet.
- Bij inspecties tijdens hoogwater zou de focus moeten liggen op het gedeelte van het talud waar golven (gaan) inslaan. De onderste 0.5 meter van het talud is hoe dan ook geen issue.
- Tot slot is besproken hoe snel de Vecht reageert: voor de crisisorganisatie moet wel kunnen worden aangetoond dat de hoeveelheid noodmaatregelen/hoogwaterinspecties tijdig kan worden aangebracht/uitgevoerd, zeker wanneer dit onderdeel wordt van het risicogestuurd beheer en onderhoud.

## E Variatiestudie b-waarde in standtijdlijn

Vier analyses zijn gemaakt om de invloed van parameter b te onderzoeken. Alle vier de analyses hebben een waarde voor parameter c van 0,25 m en een uniforme a priori verdeling voor parameter a met als ondergrens 0,1 en als bovengrens 4.

Uit iedere analyse zijn de kansverdelingen van de twee stochastische parameters bekeken. De eerste is de a-parameter en de tweede is  $\sigma$ , de standaarddeviatie van de geobserveerde data. Hoe kleiner de gemiddelde waar



## Analyse golfklapproeven en golfoverslagproeven

### Gras op zand onderzoek product 8

de van  $\sigma$  hoe beter.

Tabel 6.11 geeft een overzicht van geparametriseerde a-waarde voor verschillende waarden van b en de verschillende golfhoogtes voor een standtijd van 12 uur. Hieruit blijkt dat er geen groot verschil is in de golfhoogte bij een standtijd van 12 uur.

*Tabel 6.11 Parameters van a voor verschillende b-waarden en bijbehorende golfhoogte bij een standtijd van 12 uur*

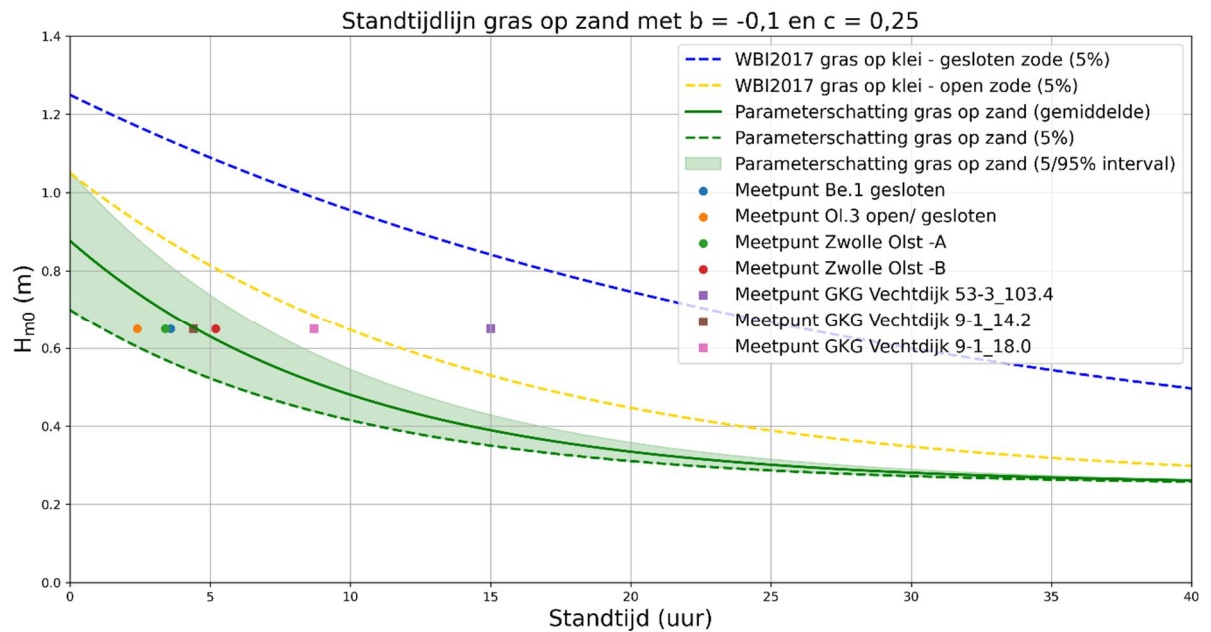
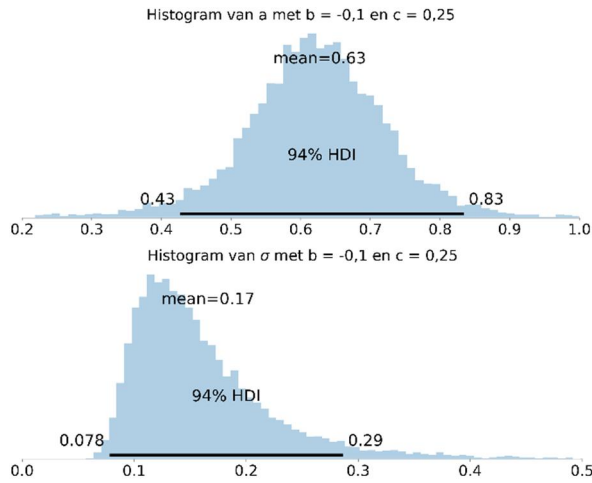
b	Gemiddelde waarde van a	Standard deviatie van a	Golfhoogte bij 12 uur
-0,1	0,629	0,113	0,38
-0,09	0,606	0,097	0,40
-0,08	0,584	0,094	0,41
-0,07	0,560	0,075	0,44

Verder kan worden gekeken naar  $\sigma$ , Tabel 6.12. Hieruit blijkt de variant met een b-waarde van -0,07 het meest geschikt te zijn doordat deze de laagste waarde heeft.

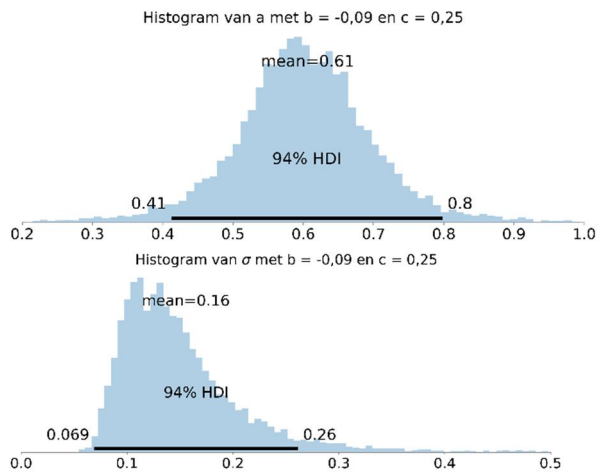
*Tabel 6.12 Gemiddelde sigma waarde voor verschillende b-waarden*

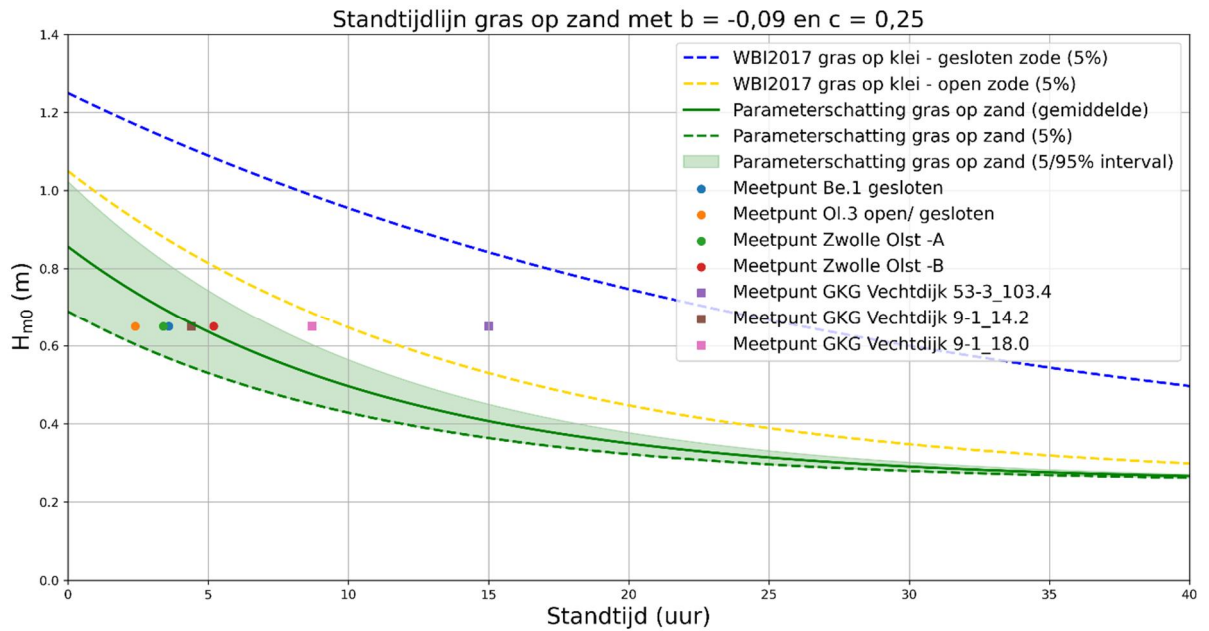
b	Gemiddelde waarde van sigma
-0,1	0,17
-0,09	0,16
-0,08	0,14
-0,07	0,13

Hieronder zijn de histogrammen van de a-parameter en  $\sigma$ -parameter met hun gemiddelde waarde en de 94% HDI (Highest Density Interval), zie Figuur 6.35 tot en met Figuur 6.38. De standtijdlijn voor verschillende b-waarden zijn hierin ook weergegeven.

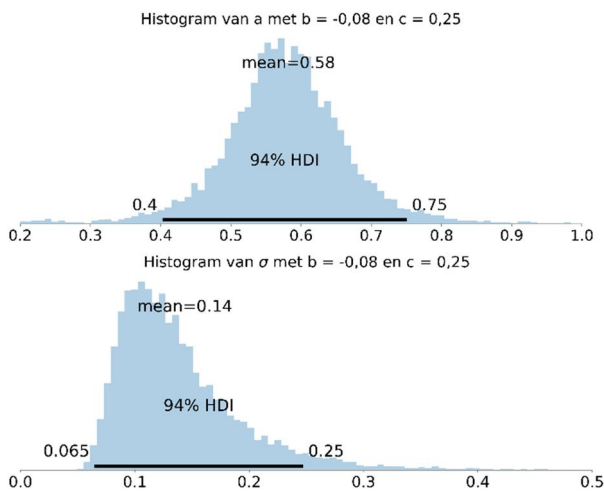


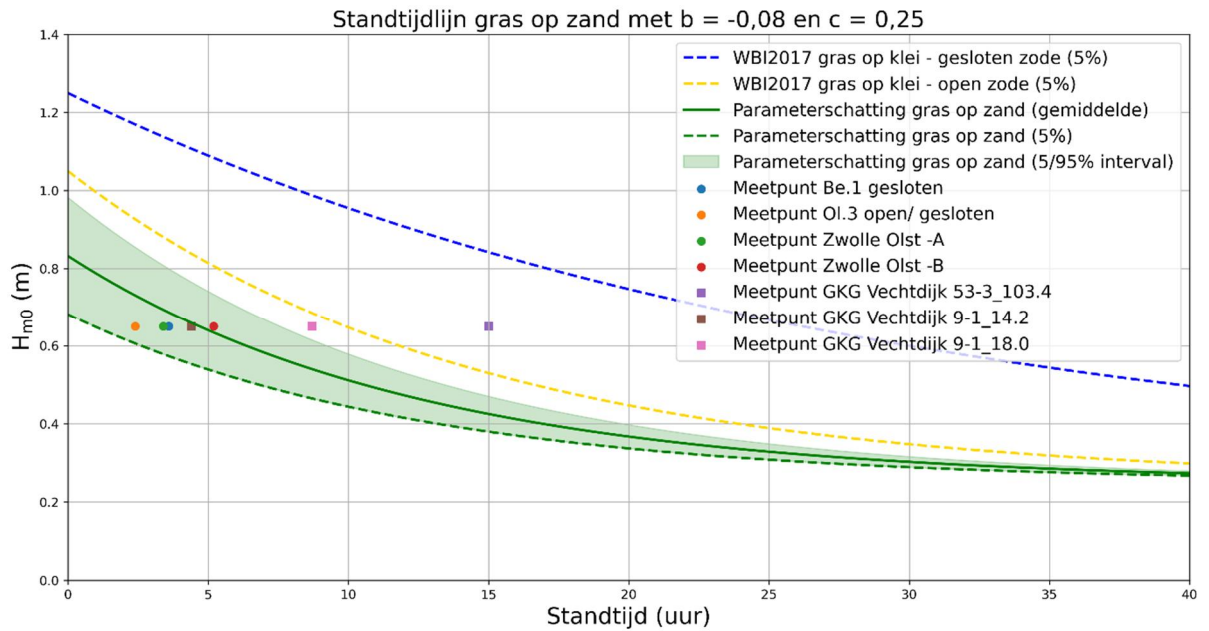
Figuur 6.35 Histogrammen van  $a$  en  $\sigma$  (boven) en standtijdlijn (onder) als een  $b$ -waarde van  $-0,1$  wordt gebruikt



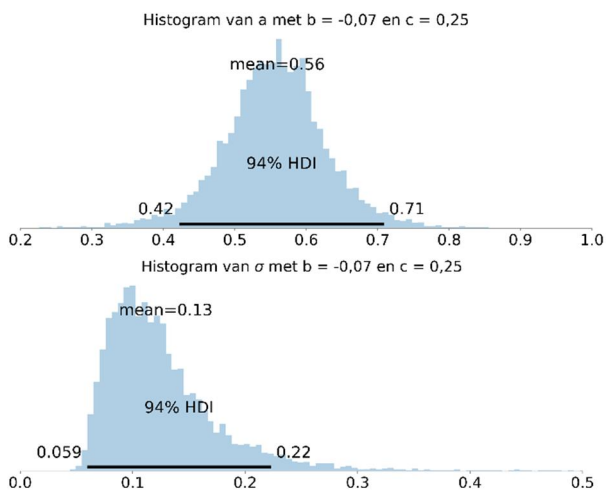


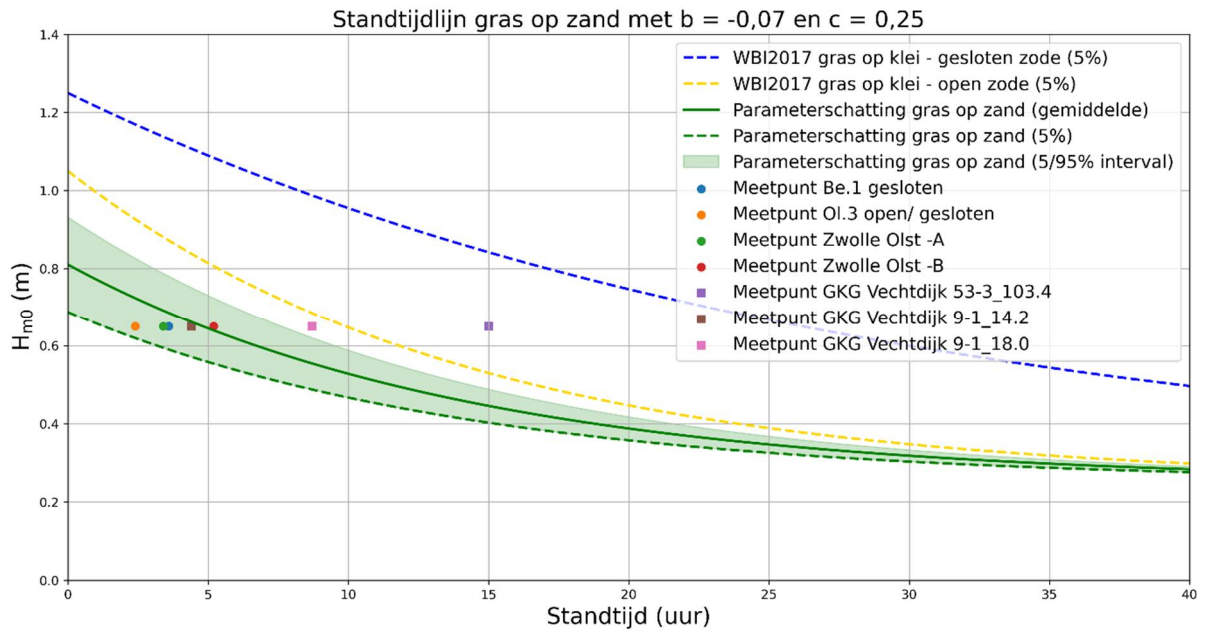
Figuur 6.36 Histogrammen van  $a$  en  $\sigma$  (boven) en standtijdlijn (onder) als een  $b$ -waarde van  $-0,09$  wordt gebruikt





Figuur 6.37 Histogrammen van  $a$  en  $\sigma$  (boven) en standtijdlijn (onder) als een  $b$ -waarde van  $-0,08$  wordt gebruikt





Figuur 6.38 Histogrammen van  $a$  en  $\sigma$  (boven) en standtijdlijn (onder) als een  $b$ -waarde van  $-0,07$  wordt gebruikt.



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)